

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук»
(НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук
(СПбНЦ РАН)

Научный Фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному
зондированию имени Нансена»
(Фонд «Нансен-центр»)

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ЗЕМЛЯ И КОСМОС»
К СТОЛЕТИЮ АКАДЕМИКА РАН
К.Я. КОНДРАТЬЕВА**

СБОРНИК СТАТЕЙ

**Санкт-Петербург
2020**

УДК 528.8:504:551.5
ББК 26.23

Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева. 20-21 октября 2020 года, Санкт-Петербург – Сборник статей – СПб.: 2020. – 334 с.

ISBN 978-5-6044977-3-9

В сборнике статей конференции «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева представлены результаты современных исследований системы «Солнце-атмосфера-Земля» на основе дистанционных методов зондирования со спутников, самолетов-лабораторий, беспилотных летательных аппаратов, а также наземных средств мониторинга парниковых газов, аэрозолей и облаков, ледяного покрова в Арктике. Выявлено, что климатические аномалии среднегодовой температуры в наибольшей степени проявляются в Арктике и особенно в Сибири. Представлены работы по численному моделированию взаимодействия физических и химических процессов в атмосфере, по идентификации фундаментального глобального климатического колебания, а также результаты экспериментальных исследований для решения народно-хозяйственных задач по освоению природных ресурсов и при строительстве соответствующей инфраструктуры и реализации Северного морского пути в Арктике. В докладах обсуждены вопросы применения методов дистанционного мониторинга изменений окружающей среды для нужд сельского хозяйства, проблемы, связанные с лесными пожарами, с источниками техногенных отходов и отвалов, с регистрацией и прогнозированием природных и техногенных катастроф. Рассмотрены результаты исследований трансграничного переноса загрязняющих веществ в атмосфере, источники и стоки парниковых газов, результаты Пан-Евразийских Экспериментов, вопросы автоматизации и обработки спутниковых данных, проблемы экологической безопасности территорий разного масштаба и др.

Все выше перечисленные направления исследований во многом являются продолжением тех работ, которые выполнялись ранее под руководством академика РАН К.Я. Кондратьева.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-05-20027.
Тексты статей публикуются в авторской редакции.

УДК 528.8:504:551.5
ББК 26.23

ISBN 978-5-6044977-3-9



© Коллектив авторов, 2020

Программный комитет

Председатель:

Бондур Валерий Григорьевич,
вице-президент РАН, академик РАН

Заместитель председателя:

Савиных Виктор Петрович, академик РАН

Члены Программного комитета:

Бузников Анатолий Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Варотсос Костас,
профессор, Афинский национальный университет
имени Каподистрии

Зеленый Лев Матвеевич,
академик РАН, профессор,
научный руководитель ИКИ РАН

Лупян Евгений Аркадьевич,
доктор технических наук,
заместитель директора ИКИ РАН

Кондратьева Светлана Ивановна

Разумовский Владимир Михайлович,
доктор географических наук, профессор,
вице-президент РГО

Румянцев Владислав Александрович,
академик РАН,
научный руководитель ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН

Бобылев Леонид Петрович,
кандидат физико-математических наук,
директор Фонда «Нансен-центр»

Двас Григорий Викторович,
доктор экономических наук, профессор,
главный ученый секретарь СПбНЦ РАН

Инге-Вечтомов Сергей Георгиевич,
академик РАН, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Крэкнелл Артур Филип,
профессор,
университет Данди, Великобритания

Петрукович Анатолий Алексеевич,
член-корреспондент РАН, директор ИКИ РАН

Ронжин Андрей Леонидович,
доктор технических наук, профессор РАН,
директор СПб ФИЦ РАН

Филатов Николай Николаевич,
член-корреспондент РАН, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Юсупов Рафаэль Мидхатович,
член-корреспондент РАН, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ,
научный руководитель СПИИРАН

Организационный комитет

Председатель:

Тронин Андрей Аркадьевич,
доктор геолого-минералогических наук, и.о. директора НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Заместитель председателя:

Биненко Виктор Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор, НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Члены Организационного комитета:

Барталев Сергей Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ИКИ РАН

Донченко Владислав Константинович,
доктор экономических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Логинов Владимир Федорович,
академик Национальной академии наук Беларуси

Крапивин Владимир Федорович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, ИРЭ РАН

Смышляев Сергей Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
РГГМУ

Угрюмов Александр Иванович,
доктор географических наук, профессор,
РГГМУ

Белан Борис Денисович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заместитель директора ИОА СО РАН

Махура Александр Григорьевич,
кандидат физико-математических наук,
Институт исследований системы Земля-атмосфера
Хельсинкского университета

Погорельцев Александр Иванович,
доктор географических наук, профессор, РГГМУ

Покровский Олег Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
РГГМУ

Тимофеев Юрий Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, СПбГУ

Щукин Георгий Георгиевич,
доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки РФ, профессор,
ВКА им. А.Ф. Можайского

Секция 1 «Исследование Земли из космоса»

УДК 551.593:629.7.014.18(551.7)

Бузников А.А.

**Академик К.Я. Кондратьев – выдающийся ученый и организатор
науки**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И.Ульянова (Ленина)»
Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5
E-mail: aabuznikov@mail.ru

Описывается творческий путь академика Кирилла Яковлевича Кондратьева. Рассмотрены основные направления его научных исследований. Выполнен обзор основных опубликованных научных работ. Перечислены государственные и научные награды ученого.

Ключевые слова: ученый, организатор науки, физика атмосферы, геофизика, метеорология, космос, дистанционное зондирование, климат, экология.

Anatoly A. Buznikov

**Academician K.Ya. Kondratyev – outstanding scientist and science
organizer**

Saint-Petersburg State Electrotechnical engineering University
Russia, 197376, Saint-Petersburg, 5, Professor Popov street
E-mail: aabuznikov@mai.ru

The creative way of Academician Kirill Yakovlevich Kondratyev and directions of scientific investigations are shown. The review of main scientific publications have made. The government and scientific rewards are mentioned.

Keywords: scientist, science organizer, atmospheric physics, geophysics, space, Remote sensing, climate, ecology.

14 июня 2020 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Кирилла Яковлевича Кондратьева – выдающегося ученого, крупнейшего геофизика, широко известного в мире специалиста в области исследований солнечной радиации, спутниковой метеорологии, дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли, глобальных изменений природной среды, динамики климата и экологии.

Кирилл Яковлевич Кондратьев прошел большой жизненный путь [1]. Он родился в г. Рыбинске, окончил школу в Ленинграде и в 1938 году поступил в Ленинградский государственный университет. Но война прервала учебу. В 1941 с третьего курса ЛГУ он ушел на фронт защищать Родину. На Ленинградском фронте он пережил блокаду и с дистрофией попал в госпиталь. После выздоровления в составе Первой Гвардейской десантной дивизии на Северо-Западном фронте защищал Москву. Был трижды ранен. После 3-го тяжелейшего ранения был демобилизован из армии, долго лечился, а затем сумел продолжить учебу сначала в МГУ, а после прорыва блокады Ленинграда в 1944 г. вернулся в ЛГУ на физический факультет, который окончил в 1946 году. Как талантливый выпускник он был оставлен для работы на кафедре физики атмосферы. Именно в ЛГУ он сформировался как ученый, педагог и организатор науки. В течение 30 лет он прошел путь от ассистента кафедры физики атмосферы, доцента, профессора, заведующего кафедрой, проректора по научной работе до ректора Ленинградского государственного университета. В дальнейшем Кирилл Яковлевич работал заведующим отделом радиационных исследований в Главной геофизической обсерватории, заведующим лабораторией методов дистанционного зондирования в Институте озероведения РАН. С 1992 г. его деятельность была связана с Санкт-Петербургским научно-исследовательским центром экологической безопасности РАН, где он был Советником РАН.

Научная и научно-организационная работа К.Я. Кондратьева продолжалась более 60 лет и была многогранной и исключительно плодотворной. С его именем связано развитие целого ряда научных

направлений физики атмосферы, актинометрии, атмосферной оптики, теории климата и глобальной экологии. Он начал свои исследования с теории переноса теплового излучения и парникового эффекта в атмосфере. В частности, это было связано с решением такой практически важной задачи как понимание природы и прогноза утренних заморозков на юге России, повреждающих виноградники. На основе этого К.Я. Кондратьев сформулировал теорию температурного режима приземного слоя атмосферы с учетом радиационного переноса и турбулентного перемешивания. Это послужило основой для разработки надежного метода расчета потока длинноволновой радиации и дивергенции потока при наличии парникового эффекта и многопараметрического описания атмосферных условий с учетом влияния водяного пара, углекислого газа, озона и аэрозолей. Первая монография К.Я. Кондратьева «Перенос длинноволнового излучения в атмосфере» [2], посвященная новому методу параметризации процессов переноса длинноволновой радиации, была опубликована в 1950 году. Доработанная и дополненная версия этой монографии под названием «Лучистый теплообмен в атмосфере» [3] вышла в 1956 г. К этому направлению научных исследований Кирилл Яковлевич в дальнейшем неоднократно возвращался. Совместно со своими коллегами и учениками он провел исследования и численное моделирование парникового эффекта для атмосфер таких планет, как Марс, Венера, Юпитер, Сатурн и Титан [4–9].

К.Я. Кондратьев был не только очень глубоким ученым, но и обладал большими организаторскими способностями. Это позволило ему сплотить вокруг себя большие коллективы исследователей из различных областей знания и направить их на воплощение его научных идей, всегда актуальных и хорошо обоснованных. Работая в Ленинградском университете, он поддерживал научные связи с Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова, где он занимал различные должности: был ведущим научным сотрудником, заведовал отделом радиационных исследований. Используя широкие возможности обсерватории для проведения научных исследований, он сосредоточил внимание на проблеме переноса в атмосфере как коротковолнового, так и инфракрасного излучений. Были исследованы спектры поглощения различных оптических компонентов таких, как водяной пар, углекислый газ, озон и примесные элементы (метан, фтороуглеродистые соединения и т.п.). Результаты этих исследований легли в основу опубликованной в 1983 году книги «Парниковый эффект атмосферы и климат» [10]. Уже тогда Кирилл Яковлевич имел представления о возможных изменениях климата и последствиях этих изменений под влиянием антропогенных воздействий на природную среду.

В распоряжении ГГО был самолет-лаборатория ИЛ-18, оснащенный аппаратурой для изучения взаимодействия атмосферы, солнечного излучения и подстилающей поверхности. Самолет-лаборатория был создан для проведения подспутниковых экспериментов при планированных запусках метеорологических спутников. По предложению Кондратьева самолет был дополнительно оснащен спектрометрической аппаратурой. Одновременно с самолетными измерениями был организован широкий комплекс наземных наблюдений, в которых участвовали ученые и специалисты вузов и Академии наук. Эксперимент назвали КЭНЭКС (Комплексный энергетический эксперимент) [11, 12], проводился он над различными типами подстилающей поверхности (водная поверхность, пустыня, степь и др.). Результаты этих экспериментов в настоящее время имеют большое значение, т.к. могут рассматриваться как базовые при оценке факторов радиационного воздействия, влияющих на современные изменения климата [13, 14]. Внимание к энергетике атмосферы, ее радиационному и энергетическому балансу оставалось постоянным при проведении по инициативе Кондратьева и под его руководством комплексных энергетических экспериментов «КЭНЭКС», «ГАРЭКС», «ПОЛЭКС», «GATE» и др. [15, 16]. Для проведения высотных самолетных измерений был использован самолет-лаборатория ИЛ-18. Этот самолет выполнил три главные функции: а) испытания прототипов спутниковых приборов; б) испытания аппаратуры дистанционного зондирования природной среды; в) изучения влияния антропогенных факторов на изменения климата и радиационных процессов в атмосфере.

Важным этапом экспериментальных исследований, выполненных под руководством К. Я. Кондратьева, были аэростатные эксперименты радиационного баланса системы «Атмосфера – Подстилающая поверхность» [17, 18]. С 1961 по 1970 гг. было осуществлено 28 подъемов аэростатов, оснащенных специальной аппаратурой, до высоты 32 км. Были получены высотные разрезы параметров атмосферы и уточнено значение солнечной постоянной [19, 20]. Позднее эти эксперименты позволили обнаружить и оценить влияние на прозрачность атмосферы высотных ядерных взрывов [21]. Возникающие при этих взрывах большие плотности высокоэнергичных корпускулярных потоков и жесткого гамма излучения влияют на состав атмосферы, а через его изменение и на прозрачность. Сопоставление параметров этих потоков с аналогичными потоками, приходящими к земной атмосфере

после мощных солнечных вспышек, позволило сделать открытие, что Солнце воздействует на радиационную энергетику атмосферы не только через плотность и спектральный состав его электромагнитного излучения, но и через вариации состава и прозрачности самой атмосферы под воздействием всплесков его корпускулярного излучения. Это позволило К.Я. Кондратьеву и его коллегам при обсуждении проблемы «ядерных зим» выстроить собственное на этот счет суждение и подтвердить сложную зависимость метеорологической солнечной постоянной не только от пятнообразовательной активности Солнца, но и от воздействия его корпускулярного излучения на состав и прозрачность атмосферы [22–23].

В начале 1960-х годов Главная геофизическая обсерватория стала одним из первых институтов, занимавшихся разработкой методов дистанционного зондирования с использованием микроволнового спектрального диапазона, когда источником информации о температуре, влажности и других параметров природной среды служит собственное тепловое излучение в СВЧ-диапазоне. Совместно с сотрудниками ИРЭ АН СССР была выполнена большая работа по изучению дистанционного метода определения влажности сельскохозяйственных полей и использования результатов этих измерений для повышения урожайности сельскохозяйственных культур, удостоенная государственной премии СССР [24–27].

Собственное тепловое излучение в СВЧ-диапазоне несет информацию о свойствах морского льда, его возрасте, толщине, температуре поверхности и т.д. В 1970 г. по инициативе К.Я. Кондратьева советские и американские ученые договорились о проведении совместного эксперимента по изучению свойств морского льда и характеристик волнения в Беринговом море (эксперимент Беринг) [28]. В этом эксперименте участвовали два корабля – американский ледокол и советское научно-исследовательское судно, а также три самолета (американский «Конвер-990» и советские «ИЛ-18» и «АН-24»). Полученные результаты были обобщены в совместных отчетах, опубликованных на русском и английском языках, в ряде монографий.

В том, что касается изменения климата, Кондратьев являлся горячим сторонником принципа «многомерных глобальных перемен», предполагающего анализ взаимодействия динамических процессов, протекающих в обществе и окружающей среде [29–34]. Кондратьев последовательно выступал против подписания Россией Киотского протокола, рассматривая его, в первую очередь, как инструмент политического давления на Россию и консервацию ее сырьевого статуса [35–42]. С научной точки зрения, он считал глобальное потепление климата не подтвержденным [38, 40].

4 октября 1957 г. в СССР был запущен первый искусственный спутник Земли. Это историческое событие, открывшее для всего человечества космическую эру, сыграло исключительно важную роль для К.Я. Кондратьева и возглавляемого им научного коллектива, который оказался к этому моменту наиболее подготовленным для активного развертывания космических исследований нашей планеты. После запуска спутника научные интересы К. Я. Кондратьева в значительной мере переместились в новую область – спутниковую метеорологию, в которую он внес значительный вклад, занимаясь методами изучения окружающей среды из космоса и интерпретацией данных [41–43]. Он был первым ученым, предложившим и обосновавшим статистический подход к анализу результатов спутниковых измерений радиационного баланса Земли [42–54]. В период 1960–1980 гг. была выполнена Программа разработки методов дистанционного зондирования природной среды с использованием специально разработанной аппаратуры, установленной на пилотируемых космических кораблях «Союз» и орбитальных станциях «Салют» [46]. В этих пионерских исследованиях участвовали многие космонавты, в число которых входили Г.Т. Береговой, А.Г. Николаев, В.Н. Волков, В.И. Севастьянов, Е.В. Хрунов, Г.М. Гречко,

П.И. Климук и др. [47–52]. Большой вклад в развитие природно-ресурсных космических исследований внес коллектив кафедры физики атмосферы (ФА) Ленинградского государственного университета, руководимый К. Я. Кондратьевым. Здесь наиболее ярко проявились организаторские способности Кирилла Яковлевича, его умение подобрать наиболее способных помощников, доверить им ответственные участки работы и всячески поощрять их активность и самостоятельность. На кафедре ФА были развернуты работы по разработке методов дистанционного зондирования и созданию спектрофотометрической аппаратуры для установки ее на ПКК и ПОС [49]. Была организована лаборатория высотной актинометрии и спутниковых измерений, на базе которой в 1975 г. было создано Особое конструкторское бюро аэрокосмической аппаратуры «Интеграл». Под руководством А.А. Бузникова (в дальнейшем доктора технических наук, профессора) был разработан и установлен на борт пилотируемых космических кораблей комплекс малогабаритных спектральных приборов, которые стали первыми в мировой практике спектральными приборами, запущенными в космос [54]. Успешное применение этих приборов на

космических кораблях «Союз» и орбитальных станций «Салют» позволило впервые в мировой практике получить спектры сумеречной и дневной атмосферы и спектры различных типов природных образований на поверхности Земли, что значительно расширило возможности космических экспериментов и способствовало внедрению спектральных методов в практику природно-ресурсных и экологических космических исследований [51–54]. С помощью спектрографа РСС-1 Летчик-космонавт Е.В. Хрунов во время полета на ПКК «Союз-5» впервые получил спектры сумеречного ореола Земли [44–47]. С помощью спектрографа РСС-2 летчик-космонавт В.И. Севастьянов с ПКК «Союз-9» впервые получил спектры различных типов природных образований на поверхности Земли [42, 48]. Летчик-космонавт В.Н. Волков детально исследовал дневной горизонт с ПОС «Салют» [46]. С приборами РСС-2М успешно работали летчики-космонавты В.В. Воинов, П.И. Климук, В.Г. Лазарев, В.М. Желобов, Ю.П. Астахов, В.В. Горбатко [53, 54]. Полученные спектры сумеречной и дневной атмосферы позволили получить данные о вертикальном распределении в стратосфере и мезосфере оптически активных компонентов (аэрозоль, озон, водяной пар и др.) и оценить влияние антропогенных факторов на состояние верхней атмосферы Земли. Кроме ранее известного глобального аэрозольного слоя Юнге были обнаружены глобальные аэрозольные слои на высотах 35 и 50 км. Получены данные о неравномерном распределении озона в атмосфере [52].

Сотрудниками кафедры Кондратьева под руководством А.А. Бузникова был разработан комплекс солнечных спектрометров КСС-2, который успешно прошел летно-конструкторские испытания на орбитальной станции «Салют-4» [53, 54]. Это был первый в мировой практике негерметизированный спектрометр высокого разрешения, работавший за пределами герметичного корпуса орбитальной станции в условиях космического вакуума. С помощью КСС-2, установленным на ПОС «Салют-4» впервые была реализована схема затменного зондирования атмосферы Земли и получены достоверные данные о вертикальном распределении водяного пара в стратосфере и мезосфере на высотах от 30 до 60 км [43–50]. На орбитальной станции «Салют-4» с КСС-2 работали летчики-космонавты В.Г. Лазарев и Г.М. Гречко [54].

В программе спектрофотометрических исследований природной среды с пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций самыми важными по значению и наиболее трудоемкими по исполнению явились комплексные синхронные подспутниковые эксперименты, впервые осуществленные по инициативе Кондратьева в октябре 1969 и в июне 1979 г. во время полетов ПКК «Союз-7» и «Союз-9» [54]. Несмотря на то, что синхронные подспутниковые наблюдения стали в настоящее время основным методом глобальных и региональных экологических космических исследований, впервые выполненные по инициативе К. Я. Кондратьева при непосредственном участии сотрудников кафедры физики атмосферы ЛГУ с привлечением сотрудников ГГО, лаборатории аэрометодов и ВИКИ им. Можайского, остаются до настоящего времени уникальными по объему и значению решенных задач в интересах дистанционного зондирования природной среды и охраны окружающей среды.

Успех этих пионерских экспериментов во многом определил приоритетный вклад советских (российских) космических исследований в изучении атмосферы и природных ресурсов нашей планеты. По результатам этих исследований были опубликованы десятки научных статей в ведущих российских и зарубежных журналах, сделаны доклады на международных научных конференциях и конгрессах, опубликован ряд монографий. Первой из них была коллективная монография «Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций», изданная в 1972 г. [42]. В дальнейшем результаты этих исследований были изложены в монографии К. Я. Kondratyev, А.А. Buznikov, О.М. Pokrovsky. «Global Change and Remote Sensing», изданной в Англии в 1996 г. [55] и др. В этих монографиях был подведен итог этого этапа космических исследований и закреплен приоритет советско-российских природно-ресурсных космических исследований.

В 1982 г. К.Я. Кондратьев перешел на работу в Институт озероведения АН СССР, где он создал лабораторию дистанционных методов, единственную такую лабораторию в лимнологических учреждениях нашей страны. Он руководил ею 10 лет, и она стала широко известной лабораторией как в СССР, так и за рубежом. Работы этой лаборатории велись по трем главным направлениям: дистанционные методы изучения динамики лимнологической окружающей среды [57–69], использование озер в качестве тестовых полигонов для испытания дистанционных методов [60] и, наконец, использование озер как естественных моделей, пригодных для изучения процессов, протекающих в морях и океанах [61–64]. Был проведен ряд крупных комплексных экспериментов с использованием аэрокосмических методов на озерах: Ладожском, Онежском, Севан [65]. В середине 80-х годов был выполнен по программе

Интеркосмос уникальный международный эксперимент на Рыбинском водохранилище и его водосборе]. На основании численного моделирования и данных полевых наблюдений были разработаны методы определения свойств озерных вод по данным измерений яркости водной поверхности [66, 67] и флюоресценции воды [68, 69]. Кроме измерений в оптическом диапазоне разрабатывались и совершенствовались новые методы дистанционного зондирования температуры, влажности, сплоченности льда в СВЧ диапазоне [70–73]. Были проведены сравнения лимнологической окружающей среды Великих русских озер (Байкал, Ладога, Онега) и Великих американских озер [72]. Полученные результаты вошли в опубликованную вместе с канадскими учеными монографию, посвященную оптическим свойствам природных вод и методам дистанционного изучения их характеристик [73]. Озеро в определенном смысле стало рассматриваться как имитационная модель океана, например, при обработке данных дистанционного зондирования, и при верификации математических моделей, разрабатываемых по программе «Разрезы». По данным, собранным на озерах, можно наиболее эффективно проводить интеркалибрацию моделей океана.

В 1992 г. по инициативе академика К.Я. Кондратьева и проф. Ола Йоханнессена (Норвегия) был создан международный научный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Фритьофа Нансена [74]. В те трудные годы, когда финансирование науки в нашей стране стало нерегулярным, международная научная кооперация явилась важной и своевременной поддержкой научных сил в России. В состав соучредителей научного фонда им. Нансена вошли Санкт-Петербургский и Бергенский университеты, НИЦЭБ РАН, Институт метеорологии им. Макса-Планка (Германия) и Институт исследований окружающей среды штата Мичиган (США). К.Я. Кондратьев и Ола М. Йоханнессен стали сопредседателями Правления Нансен-центра. Они оба много сделали для развития научных исследований в этом центре и его признания в научных кругах России и мира. Высокий авторитет этих научных организаций позволил получить достаточное количество грантов и развернуть исследования климата и океанографии Арктики, Карского и Белого морей, Финского залива и Северо-Западного региона нашей страны [75, 76]. Особенно большой вклад был сделан совместными усилиями в исследование климата Арктики и Субарктики [77, 78]. Результаты совместных научных исследований публиковались в ведущих журналах мира. Причем наибольший вклад в подготовку и публикацию этих работ внес академик К.Я. Кондратьев [79, 80]. В это время Кирилл Яковлевич был сопредседателем Российско-американской рабочей группы «Науки о Земле» и Председателем научного Совета по космическому землеведению при Санкт-Петербургском научном центре АН СССР (в дальнейшем РАН), что способствовало Нансен-центру стать соисполнителем ряда крупнейших международных и Санкт-Петербургских научных программ по экологическому мониторингу [76].

В течение последнего десятилетия главное внимание академика К.Я. Кондратьева было сосредоточено на проблематике глобальных изменений, включая проблему глобальных изменений климата [80–88]. Основное внимание он сконцентрировал на раскрытии сложной интерактивности и многомасштабности процессов в системе «природа – общество» [84], а также нелинейности динамики этой системы. Принципиальной целью исследований глобальных изменений являлся анализ взаимодействия динамических процессов, происходящих в обществе и окружающей среде [88]. Он сформулировал ключевые проблемы, связанные с глобальными изменениями, а также требования, предъявляемые в этой связи к наблюдениям и исследованиям [86–88]. Он активно поддерживал разработанную доктором биологических наук В.Г. Горшковым концепцию биотического регулирования окружающей среды [85]. Он писал, что когда заходит речь о глобальном круговороте углерода, все выражают озабоченность по поводу роста концентрации углекислого газа в атмосфере, предполагаются самые катастрофические сценарии дальнейшего развития. Однако фактический прирост концентрации CO₂ не столь велик по сравнению с результатами вычислений. Главная причина в том, что биосфера ассимилирует огромное количество углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу, что гарантирует экологическую безопасность в будущем. Если мы разрушим биосферу, выступающую в качестве резервуара для углерода, мы действительно получим экологическую катастрофу [85]. К.Я. Кондратьев всегда настаивал на том, что проблема глобальных изменений не может быть решена без использования системного подхода, учитывающего все существенные процессы. Мало будет пользы, если изолированно изучать только углекислый газ или озон. Подобные исследования должны проводиться в контексте с общей проблемой. Эта проблема нашла широкое отражение в целом ряде книг, написанных К.Я. Кондратьевым совместно со своими коллегами [86].

К.Я. Кондратьев с сотрудниками участвовал во многих Международных программах, где главным был вопрос о взаимодействии между геосферной и биосферной компонентами, таких как Международный геофизический год (МГГ), Международный год спокойного Солнца (МГСС), Программа исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП), Всемирная программа исследований климата (ВПИК) и, наконец, в Международной геосферно-биосферной программе (МГБП), главной целью которой стало исследование глобальных изменений геосферы особенно с точки зрения антропогенных воздействий на биогеохимические круговороты углерода, азота, серы, фосфора, воды, динамики таких факторов жизнеобеспечения, как радиация, качество воздуха и природных вод, плодородие почв, а также связей с биосферными и геофизическими явлениями. Полное понимание существующих проблем может быть достигнуто только при условии системного подхода. Для этого требуется глобальная система наблюдений, в которой должны быть использованы как традиционные, так и космические средства. Для того, чтобы составить долгосрочную эффективную программу исследований, все существующие возможности должны использоваться оптимальным образом с учетом имеющихся технических средств и финансовых ресурсов [88]. К.Я. Кондратьев всегда настаивал на том, что необходимо установить систему приоритетов, предусматривающих координацию функционирования совместных наблюдательных систем и средств передачи данных на Землю. Страны, участвующие в реализации проектов, должны обязательно обмениваться знаниями и опытом. В рамках советско-американского соглашения о сотрудничестве в области охраны окружающей среды, подписанного в 1972 г. и действовавшего на протяжении более 20 лет, К.Я. Кондратьев был сопредседателем рабочей группы «Науки о Земле». Проведенные в этот период совместные научные исследования охватывали самые разные области – от вулканической деятельности на Камчатке, до дистанционного зондирования сибирской тайги, подготовку и установку американского озонового спектрометра TOMS на борт российского метеорологического спутника «Метеор-3М», подготовку международного модуля для изучения природных ресурсов Земли с космической станции «Мир», запущенной в 1988 г. К.Я. Кондратьев всегда использовал свои связи с учеными и научными институтами других стран для обмена научной информацией и уделял большое внимание для подготовки монографий и издания их не только в нашей стране но и за рубежом. Научное наследие академика К.Я. Кондратьева огромно. Ему как автору (и соавтору) принадлежит более 1500 журнальных статей, напечатанных в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, и более 120 монографий, опубликованных как в нашей стране, так и за рубежом. Кипучая научная и общественная деятельность Кирилла Яковлевича Кондратьева нашли широкое признание в нашей стране и за рубежом. Он награжден Государственной премией СССР, премией и золотой медалью Всемирной метеорологической организации, золотой медалью Саймонса Королевского метеорологического общества (Великобритания), являлся почетным членом Американского метеорологического общества (США), Королевского метеорологического общества (Великобритания), Академии естественных наук «Леопольдина» (Германия), иностранным членом Американской академии искусств и наук, членом Международной академии по астронавтике; почетным доктором наук университетов Лилля (Франция), Будапешта (Венгрия) и Афин (Греция). На протяжении многих лет он был главным редактором журнала «Исследование Земли из космоса», членом редколлегий журналов «Оптика Атмосферы и океана», «Известия Русского географического общества», членом редколлегий международных журналов «Meteorology and Atmospheric Physics» (Австрия), «Idojaras» (Венгрия), «Il Nuovo Cimento C» (Италия), «Atmosfera» (Мексика), «Energy and Environment» (Великобритания).

Как участник и инвалид Великой Отечественной войны Кирилл Яковлевич Кондратьев награжден Почетным знаком «Фронтовик». В числе государственных наград – орден Ленина, два ордена Трудового Красного Знамени, Орден Отечественной войны 2-ой степени и многие медали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Академик Кирилл Яковлевич Кондратьев: из поколения победителей. Изд. 2-е, доп., – СПб.: ВВМ, 2010. – 403 с., илл.
2. Кондратьев К.Я. Перенос длинноволнового излучения в атмосфере. – М., Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. – 287 с.
3. Кондратьев К.Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. – Гидрометеиздат. 1956. – 420 с.
4. Кондратьев К.Я. Метеорология планет. – Изд. ЛГУ. 1977. – 294 с.
5. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Парниковый эффект атмосфер планет/ Итоги науки и техники. Исслед. космич. пространства, т. 10. 1983. – 156 с.

6. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Оптические свойства атмосферы Венеры и лучистый теплообмен/ Астрон. вестник, т. 15, № 4.1981. – С. 196–210.
7. Кондратьев К.Я., Крупенио Н.Н. Новое о планете Венера. – М.: Знание, № 8. 1979. – 64 с.
8. Кондратьев К.Я. «Вояджер» исследует Юпитер/ «Совр. достиж. космонавтики». – М., «Знание», № 12. 1978. – С. 34–64.
9. Kondratyev K.Ya., Moskalenko N.I. An intercomparison of the thermal radiation fields for the planets/ *Geofisica Int.*, vol. 19, No. 3. 1980. – P. 169–211.
10. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Парниковый эффект атмосферы и климат/ Итоги науки и техники. Метеор. и климатол. ВИНТИ, т. 12. 1984. – 262 с.
11. Кондратьев К.Я. Комплексный энергетический эксперимент/ ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск. 1973. – 75 с.
12. Кондратьев К.Я. и др. Программа экспедиции (КЭНЭКС-73)/ Жвалев В.Ф., Тер-Маркарянц Н.Е./ Труды ГГО, вып. 366. 1976. – С. 3–7.
13. Кондратьев К.Я. и др. Комплексное исследование особенностей метеорологического режима промышленного района г. Рустава (КЭНЭКС-72) / Ломинадзе В., Васильев О.Б., Гришечкин В.С., Гавашели Ш.Г., Жвалев В.Ф., Ивлев Л.С., Сихарулидзе В.Я./ Метеорол. и гидрол., № 3. 1976. - С. 3-14.
14. Кондратьев К.Я. КЭНЭКС: некоторые результаты и перспективы/ Метеорол. и гидрол., № 8. 1976. С. 3–6.
15. Kondratyev K.Ya. The GARP Atlantic Tropical Experiment (GATE) Monograph/ GARP Publ. Ser., No. 25. 1977. – P. 429–466.
16. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Протяженная облачность и радиация/ Глобальный метеорологический эксперимент 1978–1979. Полярный аэрозоль, протяженная облачность и радиация. – Л.: Гидрометеиздат, т. 2. 1981. – С. 5–48.
17. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Вариации солнечной постоянной по аэростатным исследованиям в 1962–1968 гг./ Изв. АН СССР, сер. ФАО, № 3. 1970.
18. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Solar constant and solar activity/ *Q. J. Roy. Met. Soc.*, v. 96, No. 409. 1970. – P. 509–522.
19. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Солнечная активность и климат/ Докл. АН СССР, т. 243, № 3. 1978. – С. 607–610.
20. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. The stratospheric mechanism of solar and anthropogenic influences on climate/ *Solar-Terrest. Influences on Weather and Climate* (Eds. E. M. McCormac, T.A. Seliga). D. Reidel Publ. Corp. Holland.1979. – P. 311–322.
21. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Возможные воздействия ядерного конфликта на атмосферу и климат/ Центр Межд. проектов ГКНТ. - М., ВИНТИ. 1984. – 48 с.
22. Кондратьев К.Я. и др. Климатические последствия ядерной войны по одномерной модели радиационно-конвективного теплообмена/ Москаленко Н. И., Гусев С. В./ ДАН СССР, 280, № 2. 1984. – С. 321–324.
23. Кондратьев К.Я. и др. Ядерная война, атмосфера и климат/ Байбаков С.Н., Никольский Г.А., Прокофьев М.А./ «Наука в СССР», № 2. – С. 2–13; № 3. 1984. – С. 2–11.
24. Кондратьев К.Я. и др. Дистанционное определение запасов продуктивной влаги в почве/ Рабинович Ю.И., Шульгина Е.М., Мелентьев В.В./ Метеорол. и гидрол., № 6. 1977. – С. 78–89.
25. Kondratyev K.Ya. et al. Passive microwave remote sensing of soil moisture/ Melentyev V.V., Rabinovich Yu.I., Shulgina E.M. / *Proc. 11th Symp. Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, vol. 7. 1977.
26. Кондратьев К.Я. и др. Дистанционная микроволновая индикация влажности почвы/ Мелентьев В. В., Рабинович Ю. И., Шульгина Е. М./ *Соврем. фундам. и прикл. исслед. ГГО*, Гидрометеиздат. 1977. – С. 66–76.
27. Кондратьев К.Я. и др. О возможностях определения характеристик поверхностного слоя почвы по его тепловому радиоизлучению/ Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М./ Доклады АН СССР, т. 194, № 6, 1978.
28. Кондратьев К.Я. и др. Итоги эксперимента «Беринг»/ Рабинович Ю.И., Мелентьев В.В./ «Советско-американский эксперимент «Беринг». - Л., 1975. – С. 7–14.
29. Кондратьев К.Я. Окружающая среда и климат. – Л., Знание, 1985. – 32 с.
30. Кондратьев К.Я. и др. Облака и климат/ Марчук Г.И., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. – Л., Гидрометеиздат.1986. – 512 с.

31. Кондратьев К.Я. Природные и антропогенные изменения климата/ «Итоги науки и техн. Метеорол. и климат», т. 15. - М., ВИНТИ, 1986. – 349 с.
32. Kondratyev K.Ya. Changes in global climate. - Rotterdam: Balkema, 1986. – 280 p.
33. Кондратьев К.Я. Глобальный климат и его изменения. – Л., «Наука», 1987. – 231 с.
34. Кондратьев К.Я. Глобальный климат/ «Итоги науки и техники. Метеорол. и климатол.», т. 17. – М., ВИНТИ, 1987. – 313 с.
35. Kondratyev K.Ya. New assessments of global climate/ Atmosfera, vol. 4, N 12, 1991. – P. 19–32.
36. Кондратьев К.Я. О Международной рамочной конвенции по проблеме изменений климата/ Изв. АН СССР. Сер. географ., вып. 5, 1991. – С. 117–122 .
37. Кондратьев К.Я. «Рио+5»: некоторые итоги Специальной сессии Генеральной Ассамблеи ООН (23-27 июня 1997 г.)/ Вестник РАН, 1997.
38. Kondratyev K.Ya., Cracknell A. P. Observing Global Climate Change/ Taylor & Francis, 1998.–544 pp.
39. Кондратьев К.Я. и др. Наша планета из космоса/ Крошкин М.Г., Морачевский В.Г., Конашенок В.Н. – Л.: Гидрометеиздат, 1964 – 94 с.
40. Кондратьев К.Я. и др. Практическое использование данных метеорологических спутников. Переведена на английский язык/ Борисенков Е.П., Морозкин А.А. – Л., Гидрометеиздат. 1966. – 362 с.
41. Кондратьев К.Я. Космическая метеорология. – Л., «Знание», 1966. – 47 с.
42. Береговой Г.Т. и др. Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций/ Бузников А.А., Кондратьев К.Я., Волков В.Н., Николаев А.Г., Севастьянов В.И., Смоктий О.И., Хрунов Е.В./ Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 399 с.
43. Бузников А.А. и др. Визуальные наблюдения дневного, сумеречного и ночного горизонтов Земли с пилотируемых космических кораблей / Кондратьев К.Я., Лазарев А.И., Мирошников М.М., Николаев А.Г., Севастьянов В.И., Смоктий О.И., Хрунов Е.В. // Космические исследования, 1972. Т.10. Вып.1. – С. 100–112.
44. Кондратьев К.Я. и др. Результаты визуальных наблюдений ночного, сумеречного и дневного горизонтов Земли по наблюдениям с «Союза-9»// Бузников А.А., Николаев А.Г., Севастьянов В.И., Смоктий О.И. // Доклады АН СССР. 1971, Т. 197, №3. – С. 574–577.
45. Береговой Г.Т. и др. Оптические явления в атмосфере по наблюдениям с пилотируемых космических кораблей. / Бузников А.А., Кондратьев К.Я. Лазарев А.И., Мирошников М.М., Николаев А.Г., Севастьянов В.И., Смоктий О.И., Хрунов Е.В. Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 48 с.
46. Бузников А.А., Кондратьев К.Я. и др. Диплом на открытие № 106. Зарегистрирован в Государственном реестре СССР 4 ноября 1971 г. за номером 106 с приоритетом 19 мая 1971 г. // Лазарев А.И., Мирошников М.М., Николаев А.Г., Севастьянов В.И., Смоктий О.И., Хрунов Е.В. Береговой Г.Т.
47. Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Орлов В.М. Спектры сумеречного ореола Земли по наблюдениям с ПКК «Союз-5» / Доклады АН СССР, 1976. Т. 226, № 6. – С. 1315–1318.
48. Кондратьев К.Я., Бузников А.А. Космическая спектрофотометрия природной среды с пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций: опыт и перспективы. М.: ВИНТИ, 1981. – 42 с.
49. Бузников А.А. и др. Спектрофотометрирование Земли с пилотируемого космического корабля «Союз-13» / Климук П.И., Кондратьев К.Я., Лебедев В.В., Орлов В.М. // Доклады АН СССР, 1975, Т. 221, № 6, – С. 1310–1313.
50. Кондратьев К.Я. и др. Измерения отношения смеси атмосферного водяного пара в стратосфере и мезосфере с помощью спектральной аппаратуры, установленной на орбитальной станции «Салют- 4»/ Бузников А.А., Гречко Г.М., Лазарев А.А., Покровский А.Г. // Доклады АН СССР, 1976. Т. 226, № 3. – С.563–565.
51. Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Покровский А.Г. Определение малых газовых компонентов стратосферы и мезосферы методом затменного зондирования // Известия АН СССР. Сер. ФАО, 1978. Т. 14. – С. 1235–1248.
52. Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Покровский О.М. Глобальная экология: дистанционное зондирование. М.: ВИНТИ, 1992. – 308 с.
53. Бузников А.А. Космическая спектрофотометрия природной среды с пилотируемых орбитальных станций. Оптический журнал, Т. 82, № 7, 2015. – С. 114–122.

54. Кондратьев К.Я. и др. Роль космонавтов-исследователей в выполнении спектральных геокосмических экспериментов с пилотируемых орбитальных станций/ Бузников А.А., Гречко Г.М./ Гагаринские чтения по авиации и космонавтике. - "Наука", 1984. - С. 239–240.
55. K.Ya. Kondratyev, A.A. Buznikov, O.M. Pokrovsky. «Global Change and Remote Sensing». Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley and Sons, 1996. - 370 pp.
56. K.Ya. Kondratyev, A.A. Buznikov, O.B. Vasilyev, et al. Some results from the sub-satellite geophysical experiment. Doklady USSR Acad. Sci. Vol. 196, No. 6. 1971. - p.1333-1336 (in Russian).
57. Кондратьев К.Я. и др. Особенности динамики вод Ладожского озера по данным дистанционного зондирования/ Филатов Н.Н., Зайцев Л.В., Зубенко Ф.С./ Докл. АН СССР, 293, № 5. 1987. - С. 1224–1227.
58. Кондратьев К.Я. и др. Возможности использования космической информации для изучения процессов загрязнения и эвтрофирования Ладожского озера/ Брук В.В., Дружинин Г.В., Егоров Л.К., Мальных И.И., Шумаков Ф.Т./ 1987. Исслед. Земли из космоса.
59. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Оптические свойства природных вод и дистанционное зондирование фитопланктона. - Л., «Наука», 1988. - 181 с.
60. Кондратьев К.Я. и др. Радиационно-гидрооптические эксперименты на озёрах/ Поздняков Д.В., Исаков В.Ю. - Л., Наука. 1990. - 115 с.
61. Kondratyev K.Ya. et al. A lake as a simulation model and test area to improve techniques for remote sensing of the ocean/ Pozdnyakov D.V., Filatov N.N./ Conf. on Remote Sens. of Atmos. and Oceans. - Canberra, 16–24 Febr., 1987.
62. Kondratyev K.Ya. et al. Modelling the radiometric color of inland waters: implication to a) Remote sensing and b) Limnological color scales/ Bukata R.P., Jerome J.H., Pozdnyakov D.V., Kotykhov A.A./ J. Great Lakes Res. Vol. 23, No. 3, 1997. - P. 254–269.
63. Kondratyev K.Ya. et al. Numerical modelling of natural water color: implications for remote sensing in limnological studies/ Pozdnyakov D. V., Bukata R. P., Jerome J. H./ Int. J. Remote Sensing. Vol. 19, No. 9, 1997. - P. 1913–1932.
64. Kondratyev K.Ya. et al. Using large lakes as analogues for oceanographic studies/ Adamenko V.N., Henderson-Sellers B./ Modelling marine ecosystems. Boca Raton etc.: CRC press. Vol. 2. - P. 299–344.
65. Кондратьев К.Я. и др. Международный комплексный многоуровневый эксперимент «Внутренние водоемы-87»/ Васильев Л.И., Ведешин Л.А., Литвинов А.С., Мелентьев В.В., Мокиевский К.А./«Исслед. Земли из космоса», № 3. 1988. - С. 119–122.
66. Кондратьев К.Я. и др. Новый подход к проблеме мониторинга водных экосистем по спектрам диффузно рассеянного излучения/ Гарбузов Г.П., Гительсон А.А./ Докл. АН СССР. 1987.
67. Kondratyev K.Ya., Pozdnyakov D. V. Application of remote sensing in the visible spectrum for hydrodynamic studies in lakes/ Water Poll.Res.J.Canada, Vol. 29, N 2/3. 1994. - P. 385–402.
68. Кондратьев К.Я. и др. Люминесцентный анализ органических веществ как основа дистанционного зондирования водных систем/ Гительсон А.А., Дубовицкий Г.А./ Доклады АН СССР. Т. 300, № 1. 1988. - С. 72–74.
69. Кондратьев К.Я., Гительсон А.А. Принципы космического мониторинга качества вод суши/ Доклады АН СССР. Т. 299, № 3. 1988. - С. 590–595.
70. Кондратьев К.Я. и др. Исследование смены фаз ледостава на крупных внутриконтинентальных водоемах умеренной зоны и возможностей их СВЧ-диагностики/ Мелентьев В.В., Тихомиров А.И., Йоханнесен О.М./ Исслед. Земли из космоса, № 3. 1998. - С. 73–80.
71. Кондратьев К.Я. и др. Космическая дистанционная индикация акваторий и водосборов (микроволновые методы) / Мелентьев В.В., Назаркин В.А. - Л.: Гидрометеиздат, 1992. - 248 с.
72. Kondratyev K.Ya., Pozdnykov D.V. Ecology of Great North-American Lakes: Problems, Decisions, Perspectives/ "Water Resources", № 1. 1993. - P. 113–122.
73. Kondratyev K.Ya. et al. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters/ Bukata R.P., Jerome J.H., Pozdnyakov D.V./ Boca Raton et.al.: CRC Press. 1995. - 362 p.
74. Kondratyev K.Ya. et al. The Nansen International Environmental and Remote Sensing Center (NIERSC) in St. Petersburg, Russia/ Johannessen O.M., Bobylev L.P. - EARSel Newsletter, No. 22, pp. 33–35, June 1995.
75. Kondratyev K.Ya. et al. Experience of the ERS-1 SAR Images Utilization for Aims of the Sea Ice Monitoring of the Russian Arctic Offshore/ Melentyev V.V., Bobylev L.P., Johannessen O., Sandven S./

- Proc. of the 2-nd International Conference on Development of Russian Arctic Offshore. - St. Petersburg, Russia, 18– 22.09.1995. – P. 141–142.
76. Кондратьев К.Я. Экодинамика и экологический мониторинг Санкт-Петербургского региона в контексте глобальных изменений. – СПб: Наука, 1996. – 443 с.
77. Кондратьев К.Я. и др. Динамика ледяного покрова Арктических морей как индикатор миграции Гренландского тюленя по данным спутниковых наблюдений для Белого моря/ Мелентьев В.В., Черноок В.И., Йоханнессон О.М./ Исслед. Земли из космоса, № 5. 1998. – С. 76–85.
78. Кондратьев К.Я. и др. Опыт спутниковой радиолокационной диагностики ледяного покрова озер: экология и история/ Мелентьев В.В., Йоханнессон О.М., Бобылев Л.П., Тихомиров А.И./ Исслед. Земли из космоса, № 2. 1998. – С. 91–101.
79. Кондратьев К.Я., Йоханнессон О. М. Арктика и климат. – СПб.: ПРОПО. – 141 с.
80. Кондратьев К.Я. Экодинамика и экологический мониторинг Санкт-Петербургского региона в контексте глобальных изменений. – СПб: Наука, 1996. – 443 с.
81. Kondratyev K.Ya., Galindo I. Global climate change in the context of global ecodynamics/ Geof.Ins., Vol.33, N 3, 1994. – P. 487–496.
82. Кондратьев К.Я. и др. Перспективы развития цивилизации. Многомерный анализ/ Крапивин В.Ф., Савиных В.П. – М.: Логос, 2003. – 573 с.
83. Кондратьев К.Я. Экодинамика и геополитика. Т. 1. Глобальные проблемы. – СПб НЦ РАН, 1990. – 1040 с.
84. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. - СПб.: Отдел оперативной полиграфии НИИ химии. СПбГУ, 2000. – 723 с.
85. Кондратьев К.Я. и др. Природная биологическая регуляция окружающей среды/ Горшков В.Г., Лосев К.С./ Вестник РАН, 1994.
86. Kondratyev K.Ya. et al. High-Latitude Environmental Pollution Problems/ Krapivin V.F., Phillips G.W. - St. Petersburg State University Press, 2002. – 280 p.
87. Кондратьев К.Я. и др. Экология – экономика – политика / Донченко В.К., Лосев К.С., Фролов А.К. - СПб НЦ РА, 1996. – 828 с.
88. Кондратьев К.Я. Глобальная система наблюдений суши (STOS): обнаружение и мониторинг глобальных экосистем // Исследования Земли из космоса, № 3, 1994. – С. 122–125.

Горный В.И.* , Крицук С.Г., Латышов И.Ш., Тронин А.А.

**Прогноз температуры поверхности городской среды
Санкт-Петербурга на основе спутникового картирования
теплофизических свойств**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,
Корпусная ул., д. 18, г. Санкт-Петербург, 197110, Россия
*E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

Целью статьи является обзор результатов исследований НИЦЭБ РАН в области прогнозирования пространственного распределения температуры поверхности городской среды по материалам космических тепловых съемок. Приведены прогнозные оценки средней по Санкт-Петербургу температуры поверхности в июле-августе 2024 г. Выполнено спутниковое картирование теплофизических свойств поверхности городской среды. Показано различие статистических распределений этих свойств для различных функциональных зон города. На основе комплекта цифровых карт теплофизических свойств с пространственным разрешением ~ 100 м выполнено моделирование прогнозных карт температуры поверхности городской среды Санкт-Петербурга. Показано, что в случае реализации верхнего предела прогнозных значений температуры воздуха в июле-августе 2024 г. температура поверхности около 38% всей территории города в дневное время превысит $+30^{\circ}\text{C}$. Предложены методы снижения температуры поверхности городской среды, основанные на повышении альbedo и коэффициента излучения.
Ключевые слова: температура, городская среда, Санкт-Петербург, спутник, съемка, прогнозирование, перегрев, парирование.

**Victor I. Gornyy* , Sergei G. Kritsuk, Uscander Sh. Latypov,
Andrei A. Tronin**

**Forecast of the surface temperature of the urban environment of
St. Petersburg, based on satellite mapping of thermophysical properties**

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences,
18, Korpusnaya st., St. Petersburg, 197110, Russia
*E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

The aim of the article is to review the results of researches of the SRCES RAS in the field of predicting the spatial distribution of the surface temperature of an urban environment based on space thermal imagery. The average surface temperature in St. Petersburg forecasted for July-August 2024 are presented. Satellite mapping of the thermophysical properties of the surface of the urban environment was performed. The difference in the statistical distributions of these properties for various functional zones of the city is shown. Forecast maps of the surface temperature of the St. Petersburg (spatial resolution ~ 100 m), using digital maps of thermophysical properties was compiled. It is shown that in case of implementation of the upper limit of the predicted values of air temperature in July-August 2024, the surface temperature of about 38% of the entire territory of the city in the daytime will exceed $+30^{\circ}\text{C}$. Methods for reducing the surface temperature of an urban environment based on increasing the albedo and emissivity of urban environment are proposed.
Keywords: temperature, urban environment, St. Petersburg, satellite, survey, forecasting, overheating, risk parry.

Введение

Для предотвращения негативных экологических последствий глобального потепления мировое сообщество планирует к концу столетия не допустить возрастание среднегодовой температуры Земли на $+2^{\circ}\text{C}$ относительно доиндустриального уровня [1]. Дополнительно к глобальному потеплению над крупными городами формируются, так называемые, «тепловые острова» повышенной температуры

воздуха и поверхности городской среды (ПГС) [2]. «Тепловые острова» формируются из-за: - низкой тепловой инерции металлических крыш и слоя пыли на ПГС (дневное время) или высокой тепловой инерции конструкционных материалов (ночное время); - антропогенного теплового потока; - повышенной концентрации парниковых газов и аэрозоля; - снижения испарения с поверхности почвы, вызванного «запечатыванием» почвы асфальтом; - сокращения площади зеленых зон. В крупных мегаполисах, таких, как Нью-Йорк, температура ПГС может на десять и более градусов превышать температуру поверхности в пригородах [3]. Повышение температуры окружающей среды негативно влияет на здоровье населения, приводит к дополнительному расходованию энергии на системы климат-контроля, ускоряет размножение насекомых [4], коррозию металлов, стимулирует выделение эко-токсикантов в результате ускорения химических реакций. Поэтому в крупных городах ситуация со снижением уровня экологической безопасности населения под влиянием наблюдаемого глобального потепления стоит более остро, чем в целом по планете. Поэтому особо актуальными являются меры по парированию риска перегрева ПГС.

Академик К.Я. Кондратьев отмечал, что в связи с формированием «тепловых островов» результаты прогнозирования глобального потепления, полученные с помощью многопараметрических физических моделей, использующих данные мировой сети метеорологических наблюдений, могут быть завышены [5]. Многие метеостанции мировой сети находятся либо в городах, либо в их ближайших пригородах. Поэтому наличие локальных «тепловых островов» может завышать результаты глобального прогноза температуры воздуха. В связи с этим представляет интерес комплексный анализ многолетних временных рядов средней температуры поверхности по городам и на окружающих город территориях, но полученных не на метеостанциях, а по всей площади, например, с помощью спутниковых измерений.

Вторым, недостаточно обоснованным моментом прогнозирования климата на основе многопараметрических физических моделей, который, также, отмечался К.Я. Кондратьевым, является произвольный выбор значений параметров моделей [6]. Этот момент еще более остро стоит при прогнозировании пространственного распределения температуры чрезвычайно гетерогенной ПГС. Например, прогнозные карты пространственного распределения температуры ПГС в настоящее время строятся на основе математического моделирования [7]. При этом, свойства городской среды подбираются из справочных данных, что вносит определенный уровень субъективизма в результаты.

Для преодоления вышеперечисленных недостатков, в рамках научных исследований НИЦЭБ РАН на первом этапе выполнен прогноз средней по городу температуры ПГС по результатам спутникового картирования температуры земной поверхности. Далее по результатам многократных тепловых космических съемок на основе математической модели суточного хода температуры поверхности [8] были построены карты тепловой инерции, скорости испарения влаги с поверхности города, антропогенного теплового потока, коэффициента излучения [3, 8–14]. Знание теплофизических свойств ПГС позволило смоделировать пространственное распределение температуры ПГС при любых заданных метеоусловиях. По результатам этих первых двух этапов исследования стало возможным не только построение карт прогнозных температур ПГС, но и обоснование технологий снижения риска перегрева ПГС.

Таким образом, целью настоящей статьи является обзор результатов НИЦЭБ РАН в области разработки спутниковых технологий построения прогнозных карт температур ПГС и разработки пассивных (не энергоемких) методов парирования угроз перегрева ПГС.

1. Прогноз температуры ПГС Санкт-Петербурга по материалам многолетних тепловых космических съемок

Для построения карт температуры поверхности (рис. 1) использовались материалы тепловых космических съемок, выполненных в период с 1983 по 2014 гг. спутниками NOAA(AVHRR) и Aqua/Terra(MODIS) [15]. Для территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области отдельно рассчитывались средние по территории температуры. Результаты представлены в виде графиков (рис. 2), на которых были построены линии трендов и выполнен прогноз температур до 2024 г.

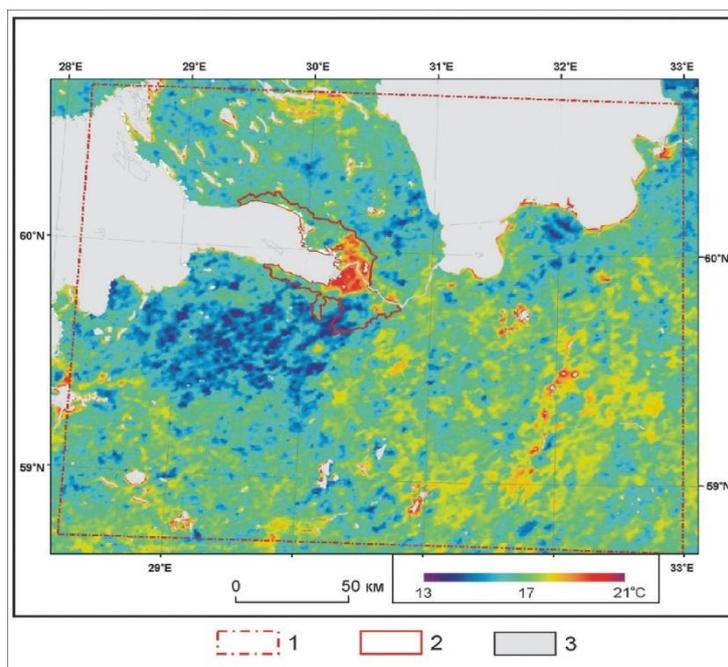


Рис. 1. Карта температуры ПГС Санкт-Петербурга и Ленинградской области, восстановленной по материалам тепловой съемки спутником Aqua (MODIS) [15]. Дата съемки: 07.08.2010 г. Условные обозначения: 1. Внешняя граница исследуемой территории Ленинградской областей. 2. Граница Санкт-Петербурга. 3. Акватории

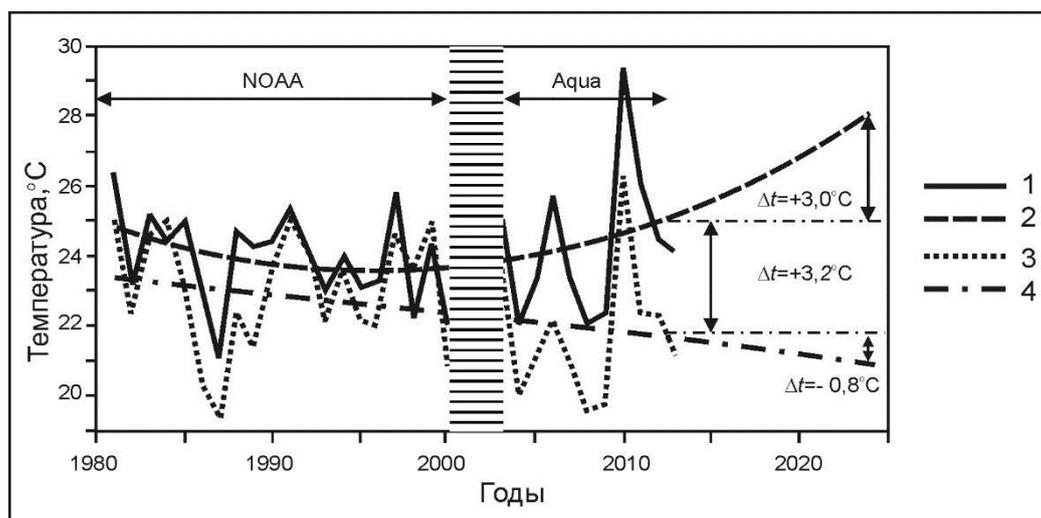


Рис. 2. Многолетние временные ряды дневных температур поверхности, усредненной для территорий Санкт-Петербурга и Ленинградской области за сезон максимального прогрева (с 4 июля по 5 августа (спутники NOAA и Aqua)) [15]. Условные обозначения: 1. Температура поверхности средняя по площади Санкт-Петербурга. Пунктиром показана линия тренда. 2. Многолетний тренд температуры поверхности Санкт-Петербурга. 3. Температура поверхности средняя по площади Ленинградской области в пределах территории (см. 1 на рис. 1). 4. Многолетний тренд температуры поверхности Ленинградской области

Основные результаты прогноза приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты прогнозирования средней по площади Санкт-Петербурга температуры ПГС в самый жаркий период года [15]

<i>Характеристика</i>	<i>Температура ПГС Санкт-Петербург</i>
Уровень многолетнего тренда для 2014 г. средней по городу температуры ПГС в июле-августе, °С	+25,1
Прогноз нагрева к 2024 г., °С	+28,1
Верхний предел средней по площади к 2024 г., °С (оптимистический прогноз)	+33,3
Максимальная дневная по городу при реализации верхнего предела прогноза температуры ПГС, °С.	+50,4

Анализ временных рядов (рис. 2) показал, что с 2004 по 2014 гг. наблюдался рост температуры ПГС Санкт-Петербурга, в том числе и по сравнению с окружающей, не урбанизированной территорией Ленинградской области. Летом 2014 г. многолетний тренд дневной температуры ПГС более, чем на +3,2°С превышал уровень тренда температуры земной поверхности Ленинградской области (рис. 2). Вместе с тем, за период с 1983 г. по 2014 г. дневная температура поверхности территории Ленинградской области монотонно снизилась на 1,4°С (рис. 2). Дальнейшее исследование этого вопроса показало, что это снижение объясняется наличием мезомасштабной конвекции, вызванной «тепловым островом» над городом [16].

Результаты показывают, что к 2024 г. в июле-августе следует ожидать повышение средней по городу температуры ПГС на +3,0°С. В [15] была найдена статистическая зависимость между температурой ПГС на метеостанции Санкт-Петербурга и температурой воздуха:

$$t_a = 0,92t_s - 0,45;$$

где: t_s и t_a - соответственно температуры ПГС и воздуха на высоте 2 м над поверхностью. Отсюда рост средней по городу температуры воздуха в наиболее жаркий период 2024 г. по сравнению с 2014 г. может быть оценен как $\Delta t_a = +2,3^\circ\text{C}$.

2. Карты теплофизических свойств ПГС

По материалам 10-кратной тепловой космической съемки, выполненной спутниками Terra/Aqua (MODIS) 17–19.05.2014 г. и одной сцены спутника Landsat 8 (17.05.2014 г.) были построены карты теплофизических свойств ПГС (рис. 3) по методикам изложенным в [12–14]. Статистики распределений закартированных теплофизических свойств ПГС функциональных зон Санкт-Петербурга приведены в табл. 2. В табл. 3 приведены результаты определений тепловой инерции некоторых ПГС, по результатам наземных режимных измерений [14].

Анализ статистик теплофизических свойств ПГС Санкт-Петербурга показал, что тепловая инерция ПГС в целом достаточно высока из-за высоких значений этой характеристики большинства конструкционных материалов [8] и дорожных покрытий (табл. 3). Высокой же тепловой инерцией характеризуются и лесопарковые зоны. С уменьшением площади зеленых зон последовательно снижается испаряемость (табл. 2 и рис. 3). Наибольшими значениями испаряемости обладают лесопарковые зоны, наименьшими – производственные зоны Санкт-Петербурга. Наибольшие значения инкремента теплового потока отмечены в производственных зонах (рис. 3, табл. 2).

Таблица 2

Теплофизические характеристики функциональных зон Санкт-Петербурга по результатам спутниковых съемок [14]

Функциональные зоны	Тепловая инерция, ЕТИ ¹		Инкремент антропогенного теплового потока ² , Вт.м ²		Испаряемость, доля единицы	
	Среднее	Ср. кв. откл.	Среднее	Ср. кв. откл.	Среднее	Ср. кв. откл.
Рекреационные на окраине	1440	±160	0,0	±2,8	1,03	±0,08
Застройки индивидуальными домами (садоводства)	950	±150	6,5	±1,8	0,72	±0,06
Малоэтажной, многоквартирной застройки	1120	±400	9,5	±3,7	0,68	±0,13
Многоэтажной застройки (новостройки)	1130	±320	11	±3,8	0,56	±0,13
Среднеэтажной и многоэтажной застройки	1300	±150	17,4	±2,3	0,41	±0,10
Общественно-деловая	1470	±150	21,6	±2,61616	0,32	±0,12
Транспортной инфраструктуры	930	±240	13,8	±6,1	0,37	±0,23
Производственная	1240	±140	26,3	±3,9	0	0,18

Таблица 3

Тепловая инерция ПГС Санкт-Петербурга по данным наземных режимных измерений [14]

Тип ПГС	Тепловая инерция, ЕТИ	Альбедо
Крыша железная, окрашенная. Дом старой постройки, Петроградский район	80	0,13
Крыша панельного дома новой постройки, Купчино	940	0,14
Дорожное покрытие старое (асфальт), Петроградский район	1200 ±100	0,19

¹ ЕТИ – единица тепловой инерции, Дж / (м²·К)

² Под инкрементом теплового потока здесь понимается приращение теплового потока в данной функциональной зоне по отношению к пригородной зоне, отражающее в основном потери антропогенной энергии.

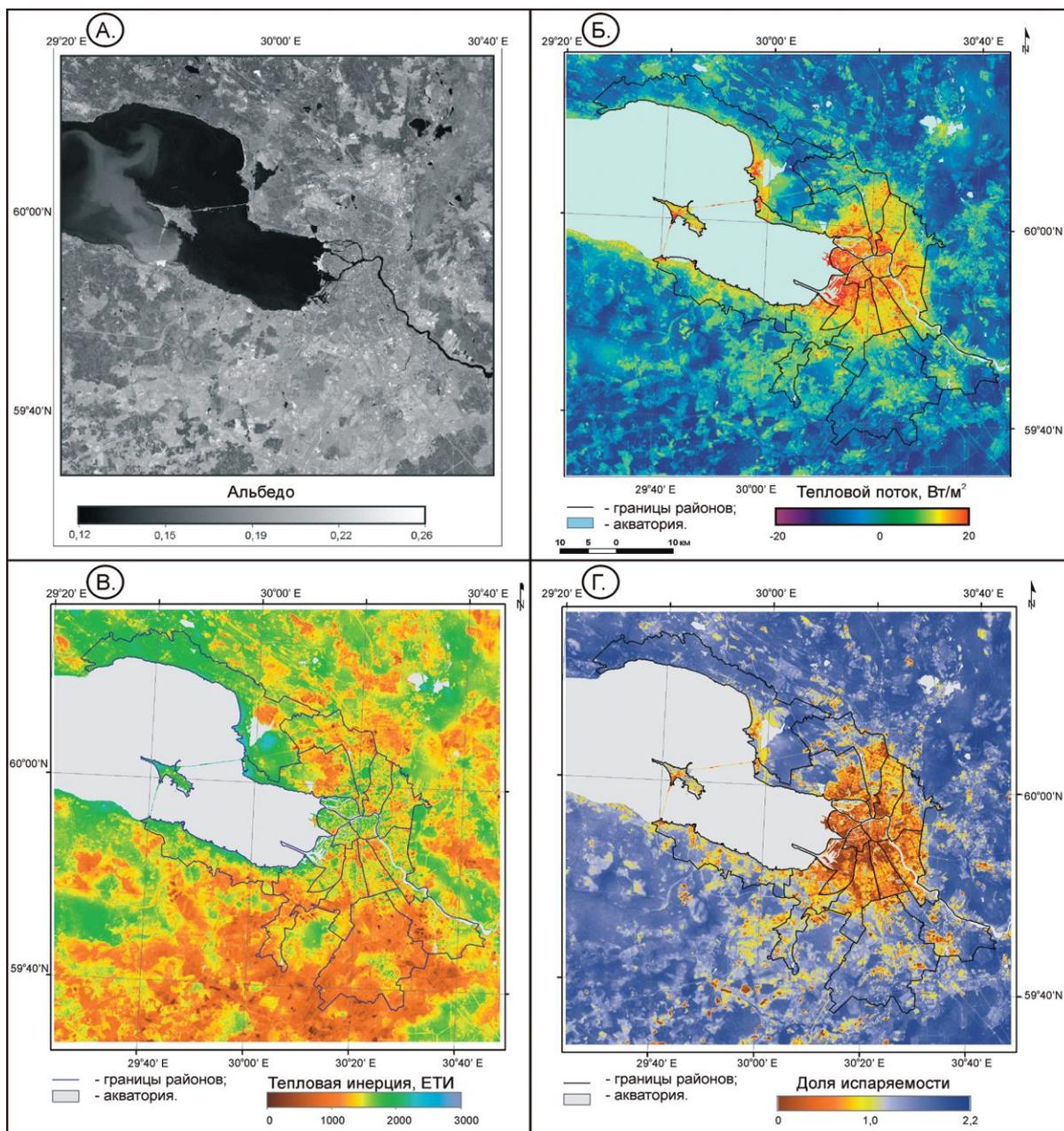


Рис. 3. Карты теплофизических свойств и альbedo ПГС Санкт-Петербурга, построенные по материалам многозаводных космических съемок [14]: А. – альbedo поверхности; Б. – антропогенный тепловой поток; В. – тепловая инерция; Г. – доля испаряемости влаги

3. Прогноз температуры ПГС на основе карт теплофизических свойств

Прогнозирование выполнялось с использованием набора цифровых карт физических свойств ПГС (рис. 3) с применением той же самой математической модели суточного хода температуры поверхности [8], которая была использована при построении этих карт. Расчет велся для прогнозируемых температур воздуха. В результате, если при реализации прогнозного потепления $28,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура ПГС только в 2% всей площади города (рис. 4А) превысит $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, то при приходе «тепловой волны» площадь перегрева составит уже $\sim 38\%$ (рис. 4Б), т. е. будет перегрета уже вся историческая часть города.

Знание физических свойств ПГС позволило разработать пассивные (не энергозатратные) методы парирования риска перегрева ПГС в результате прогнозируемого потепления. В качестве примера приведены результаты математического моделирования температуры поверхности металлической крыши (рис. 5). Моделирование показало, что применение специальных красок, обладающих высокими альbedo и коэффициентом излучения (3 на рис. 5) позволит в дневное время снизить температуру поверхности металлической крыши в центре Санкт-Петербурга на $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

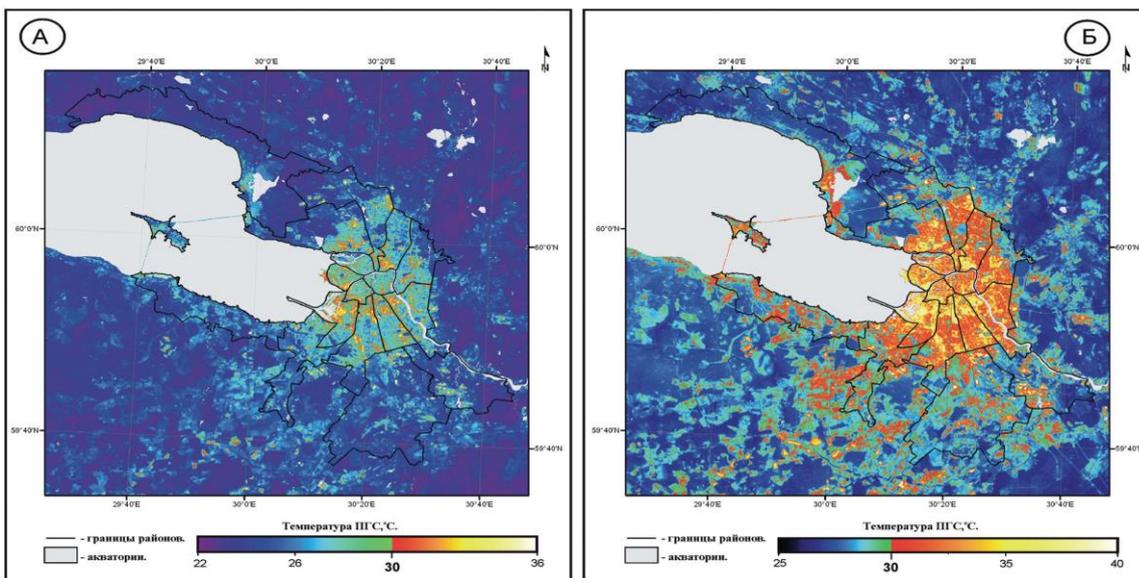


Рис. 4. Карты прогноза температуры поверхности Санкт-Петербурга в 15 ч 00 мин в конце июля – начале августа 2024 г. при различных сценариях потепления климата [17]: А — повышение температуры воздуха до +28,1 °С — сценарий реализации многолетних тенденций роста температуры воздуха (см. на рис. 2); Б — повышение температуры воздуха до +32,8°С — сценарий достижения значений близких к верхней оценке прогноза тенденций роста температуры воздуха в случае «тепловой волны»

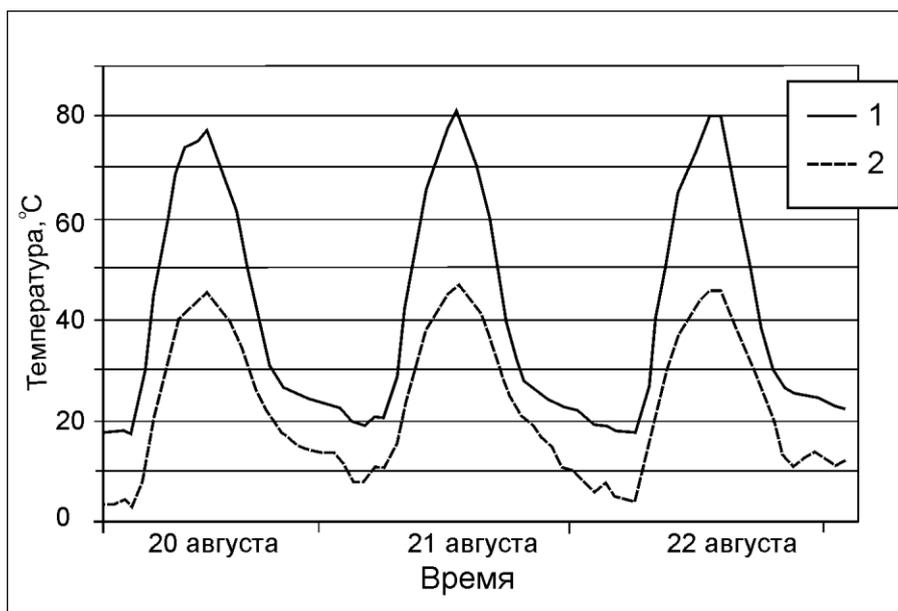


Рис. 5. Результаты математического моделирования температуры поверхности металлической крыши. Условия расчета: август 2024 года. Температура воздуха при моделировании увеличена на +2,3°С по сравнению с августом 2015 г. Условные обозначения: 1. Крыша с современными характеристиками. Результат моделирования соответствует данным режимных измерений температуры крыши в 2015 г. Тепловая инерция 80 ЕТИ, альbedo $A=0,13$; коэфф. излучения $\epsilon=0,780$;

2. Осветленная крыша с повышенным коэффициентом излучения покрытия. Тепловая инерция 80 ЕТИ, альbedo $A=0,60$; коэфф. излучения $\epsilon=0,985$.

В заключении следует отметить, что исследования по разработке теоретических основ тепловой аэрокосмической съемки, поддержанные с самого начала их постановки академиком К.Я. Кондратьевым, позволили дать научное обоснование решения практически важной задачи обеспечения уровня экологической безопасности населения Санкт-Петербурга в условиях изменяющегося климата.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 14-05-90416 и НАН Украины грант № 10-05-14 (У) «Исследование влияния урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад Конференции Сторон о работе ее семнадцатой сессии, состоявшейся в Дурбане с 28 ноября по 11 декабря 2011 года / Рамочная Конвенция об изменении климата. Организация Объединенных Наций. 2012. 106 с. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/rus/09a01r.pdf>.
2. Bornstein R.D. Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City // J. Applied Meteorology. 1968. V. 7. No. 4. P. 575–582. URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200450%281968%29007%3C0575%3AОбОТУНН%3E2.0.CO%3B2> (accessed in 2019).
3. Price J.C. On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales // Journal of Applied Meteorology. 1982. Vol. 21. P. 1111–1122.
4. Марченко М.И. Классификация энтомофауны трупa. Биология мух и их судебно-медицинское значение // Судебно-медицинская экспертиза. 1980. № 2. С. 17–20.
5. Кондратьев К.Я. Неопределенность данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. 2004. №4. с. 93–119.
6. Демирчян К.С., Кондратьев К.Я., Демирчян К.К. Глобальное потепление и «политика» его предотвращения // Биосфера. 2010. т. 2. №4. с. 488–502.
7. Gutierrez E., Gonzalez J. E., Martilli A., Bornstein R., Arend M. Simulations of a Heat-Wave Event in New York City Using a Multilayer Urban Parameterization // J. Applied Meteorology and Climatology. 2015. V. 54. P. 283–301.
8. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка / Москва, Недра, 1993, 128 с.
9. Watson K., Rowan L.C., Offield T.V. Application of Thermal Modeling in Geologic Interpretation of IR Images // Proceedings of 7-th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, Michigan. 1971. P. 2017–2041.
10. Watson K., Regional thermal inertia mapping from an experimental satellite // Geophysics. 1982. Vol. 47. p. 1681–1687.
11. Cracknell A.P., Xue Y. Thermal inertia determination from space – a tutorial review // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17. No. 3. P. 431–461.
12. Горный В.И. Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. С. 10–16.
13. Крицук С.Г., Горный В.И., Латыпов И.Ш. Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 277–290.
14. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Киселев А.В., Бровкина О.В., Филиппович В.Е., Станкевич С.А., Лубский Н.С. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 51–66.
15. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Филиппович В.Е., Станкевич С.А., Бровкина О.В., Киселев А.В., Давидан Т.А., Лубский Н.С., Крылова А.Б. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191.
16. Горный В.И., Донченко В.К., Самуленков Д.А., Сапунов М.В., Бровкина О.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. О циркуляции воздушных масс в «тепловых островах» городов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 207–212.
17. Тронин А.А., Горный В.И., Груздев В.Н., Шилин Б.В. Многолетние аэрокосмические наблюдения температуры земной поверхности Северо-Западного региона РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 73–96.

Груздев В.Н.^{1,2}, Шилин Б.В.^{1,2*}

Индикационная роль спектральных характеристик

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук, Корпусная ул., д. 18, г. Санкт-Петербург, 197110, Россия

²Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Россия

*E-mail: bshilin@rambler.ru

Экспериментально показаны примеры существенных искажений, возникающих при вычислениях коэффициента спектральной яркости (КСЯ) объектов.

Ключевые слова: коэффициент спектральной яркости (КСЯ), спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), спектрорадиометр.

Victor N. Gruzdev^{1,2}, Boris V. Shilin^{1,2*}

Indicative role of spectral characteristics

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, 18, Korpusnaya st., St. Petersburg, 197110, Russia

²Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, 197198, Russia

*E-mail: bshilin@rambler.ru

Examples of significant distortions that arise when calculating the coefficient of spectral brightness of objects are shown experimentally.

Keywords: optical characteristics, coefficient of spectral brightness, spectral density of energy brightness, spectroradiometer.

Введение, постановка задачи

До последнего времени в дистанционном зондировании фундаментальной основой изучения закономерностей изменения оптических характеристик объектов является коэффициент спектральной яркости (КСЯ). Это отношение спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) объекта и эталона. При использовании для этих целей точечных (профильных) спектрорадиометров это обосновывалось существенным влиянием на результаты условий выполнения аэрокосмической или полевой съёмки, некорректностью сравнения при этом СПЭЯ объектов. КСЯ в значительной степени устраняет эти влияния, хотя и вносит при вычислениях искажения характера исходных (измеренных) данных СПЭЯ. Этому не придавалось значения до появления в последние десятилетия видеоспектрометров – приборов, позволяющих получать спектральную информацию по площади аэрокосмической или полевой съёмки практически одновременно. Это, в свою очередь, позволяет объективно в одинаковых условиях проводить сравнение оптических характеристик в пределах площади съёмки. При этом встаёт вопрос о «потерях и искажениях» спектральной информации при вычислениях КСЯ.

Материалы и методы

Как показывают наши многолетние исследования с высокоточными спектрорадиометрами PSR 1100 и PSR 3500 в строго контролируемых лабораторных условиях с горными породами, минералами, растениями при низких значениях СПЭЯ кривые КСЯ имеют значительные искажения. Соответствующие примеры для разных объектов представлены на рис. 1 и 2.

Результаты

Рисунок 1 – кривые КСЯ выветрелой и чистой (скол) поверхности образца габбродиорита, полученные по результатам измерений спектрорадиометром PSR 3500 при освещении Солнцем и

собственным источником прибора. Чётко видны значительные амплитудные различия КСЯ при освещении двух источников. При освещении Солнцем кривые КСЯ, как правило, выше. Аналогичные закономерности получены для гранита, гранодиорита и других пород и минералов.

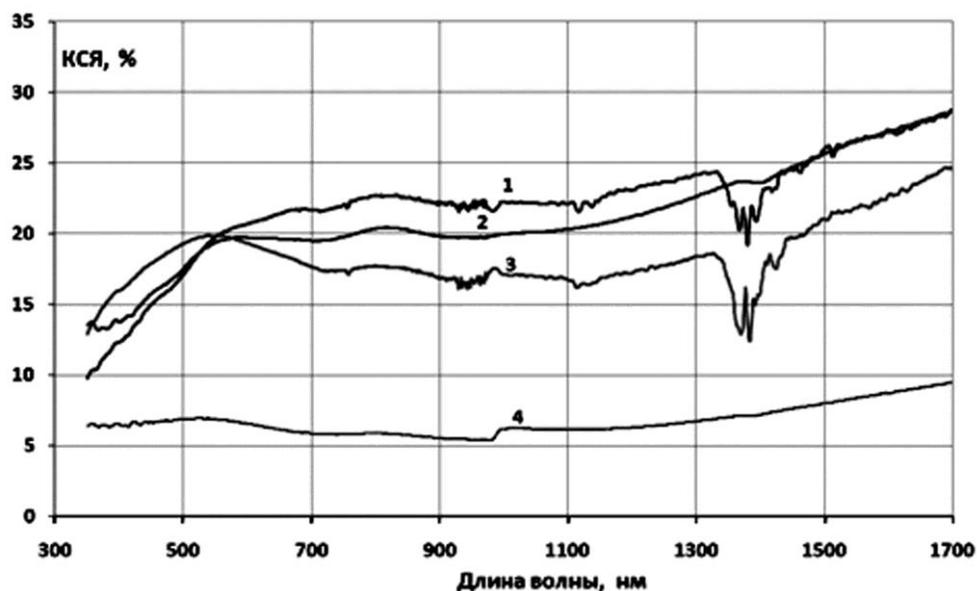


Рис. 1. Кривые КСЯ габбродиорита при различных источниках освещения. 1 – солнце, выветрелая поверхность; 2 – солнце, свежий скол; 3 – внутренний источник света спектрорадиометра, скол; 4 – внутренний источник, выветрелая поверхность

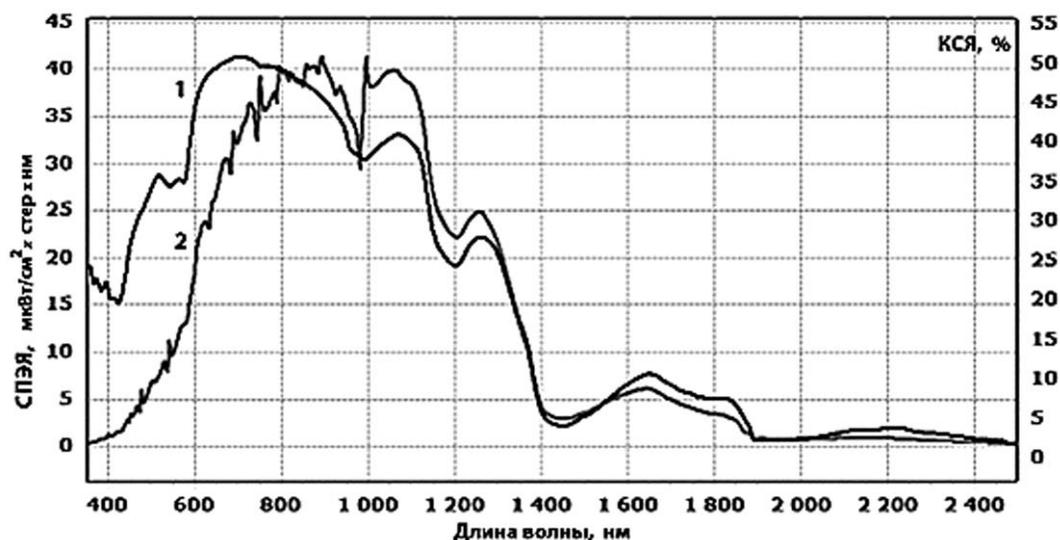


Рис. 2. Кривые КСЯ - 1 и СПЭЯ - 2 кожного покрова человека (шея), полученные по результатам измерений спектрорадиометром PSR 3500 при освещении собственным источником прибора

Интересные данные получены при измерениях кожного покрова человека – рис. 2. Чётко видно, что кривая КСЯ сдвинута в коротковолновую область относительно кривой СПЭЯ. Аналогичные результаты получены для других частей тела и для большого количества людей, в том числе при измерениях видеоспектрометром [1]. Такой «спектральный сдвиг» не может иметь места реально и возник только в результате вычислений КСЯ.

Заключение

В связи с изложенным выше представляется на настоящем этапе исследований оптических характеристик для целей экологии, сельского хозяйства, геологического картирования, изучения различных фоноцелевых ансамблей использовать видеоспектрометры с регистрацией СПЭЯ по площади

с высоким спектральным и геометрическим разрешением. Имеются примеры, практически иллюстрирующие это положение [2].

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ, проект 16-29-09449.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.А., Шилин Б.В., Шилин И.Б. Опыт полевых видеоспектральных исследований. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №4. С. 89–94.
2. George T. Elerding, John G. Thunen, and Loren M. Woody. Wedge Imaging Spectrometer: Application to drug and pollution law enforcement. Hughes Aircraft Company Santa Barbara Research Center 75 Coromar Drive, Goleta, CA 93117.

**Зеленцов В.А. *, Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р., Потрясаев С.А.,
Семенов А.Е.**

**Информационные технологии и система для выполнения
междисциплинарных проектов и создания тематических сервисов
с использованием данных дистанционного зондирования Земли**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН),

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,
14 линия д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

*E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com

Работа посвящена описанию архитектуры и примеров реализации информационных технологий и системы для автоматизации выполнения междисциплинарных проектов и создания тематических сервисов, требующих использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве базовых предлагается использовать подходы на основе сервис-ориентированной архитектуры, применения веб-сервисов для организации взаимодействия компонентов системы, и технологий на основе языка исполнения бизнес-процессов для описания алгоритмов взаимодействия отдельных модулей и информационных ресурсов, привлекаемых для выполнения проектов. В прикладных примерах по созданию тематических сервисов комплексно используются данные с КА ДЗЗ семейств Ресурс-П, Канопус-В, Sentinel, Landsat, и др. Результаты апробации показывают, что предлагаемые подходы обеспечивают выполнение основных требований к создаваемым информационным системам, в том числе достижение максимальной автоматизации решаемых задач и удобство для пользователя. В целом, разработанный набор технологий представляет собой достаточно универсальный конструктор, который позволяет создавать удобные инструменты поддержки принятия решений в различных предметных областях, в том числе в области экологии и защиты окружающей среды, лесопользования, мониторинга и прогнозирования ЧС, и др.

Ключевые слова: информационные технологии, автоматизация, веб-сервисы, данные дистанционного зондирования, сервис-ориентированная архитектура, междисциплинарные проекты.

**Zelentsov V.A. *, Pimanov I.Yu., Ponomarenko M.R., Potryasaev S.A.,
Semenov A.E.**

**Information technology and a system for implementing interdisciplinary
projects and creating thematic services using Earth remote sensing data**

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, 199178, St. Petersburg, Russia

*E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com

The paper describes an architecture and examples of information technologies and systems implementation for automating interdisciplinary projects accomplishment and creating thematic services that require utilizing Earth remote sensing data. It is proposed using approaches based on a service-oriented architecture, applying web services to organize the interaction of system components, and technologies based on the Business Process Execution Language to describe the interaction algorithms of individual modules and information resources involved into projects implementation. In applied examples for creating thematic services, data from Resource-P, Kanopus-V, Sentinel, Landsat satellite constellations, and other are comprehensively used. Testing results show that the proposed approaches ensure that basic requirements for the information systems being created are met, including achieving maximum automation of systems running and user friendliness. In general, the developed set of technologies is a fairly universal toolkit that allows you to create convenient decision support tools in various

subject areas, including ecology and environmental protection, forestry, emergency monitoring and forecasting, etc.

Keywords: information technology, automation, web services, remote sensing data, service-oriented architecture, interdisciplinary projects.

Введение

Одной из основных особенностей научных исследований и прикладных разработок, связанных с использованием пространственных данных, в том числе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), является их междисциплинарность. Примерами могут быть задачи экологического мониторинга, моделирования развития чрезвычайных ситуаций, управления лесопользованием, и т.д. Междисциплинарность возникает как следствие необходимости одновременного использования, во-первых, сложных предметно-ориентированных комплексов моделей для оценивания и прогнозирования состояния природных и природно-технических объектов (ППТО); во-вторых, разнородных наземно-аэрокосмических данных и результатов их обработки; в-третьих, инструментальных средств интеграции необходимых моделей и данных при выполнении конкретных проектов и (или) создании тематических сервисов различной прикладной направленности.

В настоящее время зачастую на решении задач моделирования в конкретной прикладной области специализируются организации, разработчики и исследователи, не обладающие современными инструментами автоматизации моделирования, интегрированного анализа данных и представления результатов. В то же время разработчики информационных технологий нередко не имеют доступа к специализированным моделям (полимоделным комплексам) анализа ППТО и используют упрощенные подходы для создания тематических сервисов. И в том, и в другом случае снижается прикладная ценность получаемых результатов.

Такое положение в значительной степени обусловлено недостаточной проработкой методов, технологий и систем, обеспечивающих интеграцию в рамках единого вычислительного процесса доступных данных о состоянии ППТО, включая данные ДЗЗ, моделей изменения состояния ППТО в обычных условиях и при ЧС, и оснащенных необходимыми инструментами для предоставления результатов расчетов пользователям в доступной и наглядной форме в виде соответствующих тематических продуктов и сервисов. Проведенный анализ показал, что описанная проблема может быть решена на базе концепции комплексной автоматизации и интеллектуализации задач получения, обработки, анализа и практического использования разнородных данных, поступающих из различных источников [1–3].

Решение данной проблемы направлено также на уменьшение существующего разрыва между нарастающими объемами данных ДЗЗ и степенью их реального использования для широкого круга прикладных задач. В настоящее время в России [4–11] и за рубежом [12–21] существует большое количество тематических сервисов, основанных на использовании данных ДЗЗ. Однако, существует ряд факторов, ограничивающих возможности их использования широким кругом пользователей в различных сферах деятельности. Подобные ограничения в первую очередь касаются предоставляемого набора инструментов и тематических продуктов. В частности, пространственный охват тематических продуктов, предоставляемых зарубежными сервисами, зачастую ограничен: например, большинство данных сервисов европейской программы Copernicus [12–16] либо недоступно для территории России, либо охватывает преимущественно её европейскую часть. Кроме того, не все сервисы находятся в свободном доступе: к примеру, Copernicus Emergency Service [13] доступен только для ограниченного числа специализированных организаций (в основном - осуществляющих деятельность в области мониторинга ЧС). При этом, если тематические продукты, имеющие глобальный или региональный охват, формируются в результате автоматической обработки, то получение информации на локальные участки требует обработки данных ДЗЗ в ручном или автоматизированном с участием специалистов, а получаемые результаты имеют ограничения по пространственному разрешению и детализации. Расширенный набор инструментов обработки предоставляют облачные платформы Thematic Exploitation Platforms (TEPs) [19], Copernicus Data and Information Access Services (DIAS) [20], Copernicus Research and User Support (RUS) Service [21]. Однако эффективное использование данных платформ требует от пользователя специальных знаний в области обработки данных ДЗЗ и ГИС. В российских сервисах используются данные с отечественных и зарубежных космических аппаратов, в том числе, данные, предоставляемых в рамках европейской программы Copernicus (в частности, данные со спутников семейства Sentinel) [4, 6, 8–10].

Однако, возможности интегрированного использования российских и зарубежных данных для создания тематических сервисов ограничены.

Кроме того, проанализированные системы и инструментальные средства ориентированы преимущественно на работу с данными ДЗЗ, в то время как для решения прикладных междисциплинарных задач необходимо использовать как данные ДЗЗ и результаты их обработки, так и данные и информацию, поступающих из других источников (например, от беспилотных летательных аппаратов, от наземных измерений, данные о территории и объектах инфраструктуры, и т.п.), а также результаты, полученные с использованием моделей из соответствующих предметных областей для анализа и прогнозирования состояния ППТО. Известны лишь единичные случаи предоставления моделей предметных областей как сервиса для работы с пользовательскими данными. Однако широкого использования такие системы, совмещенные с возможностями использования данных ДЗЗ при моделировании, до настоящего времени не получили.

В данной работе рассматриваются архитектура информационной системы (ИС) и программно-технологические средства, направленные на решение данной проблемы. В качестве базовых принципов создания предлагаемой ИС рассматриваются использование сервис-ориентированной архитектуры, обеспечение максимально полной автоматизации ИС и простоты взаимодействия с системой пользователя. Реализация данных принципов обеспечивает совместную работу территориально распределенных информационных ресурсов (источников наземных данных, сервисов доступа к данным ДЗЗ, моделирующих комплексов) в рамках единой системы в оперативном режиме.

Материалы и методы

Концепция комплексной автоматизации базируется на результатах двух направлений исследований. Первое из них включает вопросы разработки методов и технологий многокритериального оценивания, анализа и выбора моделей и полимодельных комплексов для описания процессов функционирования ППТО в тех или иных условиях обстановки, в том числе при возникновении ЧС. Данное направление развивается в рамках квалиметрии моделей и полимодельных комплексов [3], предоставляя методическую базу для автоматизации процедур выбора конкретных моделей ППТО при выполнении междисциплинарных проектов и создании тематических сервисов.

Второе из названных направлений включает вопросы разработки, выбора и адаптации архитектур и программно-технологических решений по построению систем, непосредственно предназначенных для создания тематических сервисов с использованием данных ДЗЗ. Это направление рассматривается более подробно в рамках данной работы.

Основными функциями разрабатываемых программно-технологических решений и соответствующей информационной системы являются обеспечение в оперативном режиме интеграции разнородных информационных ресурсов (выбранных моделей ППТО, данных ДЗЗ, результатов наземных измерений и вспомогательных данных), организация взаимодействия с внешними информационно-аналитическими системами, анализ и интерпретация полученных результатов моделирования, их визуализация и предоставление конечному пользователю в виде тематических сервисов. Перечисленные функции формируют базовые требования к архитектуре создаваемой ИС.

Известны следующие основные подходы к созданию архитектуры систем подобного назначения [22]: монолитная архитектура; модульная архитектура; компонентная архитектура; клиент-серверная архитектура; сервис-ориентированная архитектура. Проведенный сравнительный анализ показал, что наиболее предпочтительным вариантом построения ИС, с учетом предъявляемых требований, является использование сервис-ориентированной архитектуры (СОА), реализующей модульный подход к разработке программного обеспечения, и использование распределённых, слабо связанных заменяемых компонентов, оснащённых стандартизированными интерфейсами для взаимодействия через информационно-телекоммуникационные сети. СОА позволяет обеспечить распределённое использование разнородных ресурсов, тем самым упрощая организацию взаимодействия между различными частями системы, поддержкой и развитием которых зачастую занимаются разные коллективы и компании. Связь модулей системы осуществляется через сервисную шину (Enterprise Service Bus, ESB). Сервисная шина является традиционным для СОА способом организации «общения» между сервисами, имеет инструменты для централизованного и унифицированного событийно-ориентированного обмена сообщениями между различными модулями информационной системы [23]. Использование такого подхода позволяет встраивать в информационную систему законченные программные решения (не требующие дополнительной валидации и верификации), не требует привязки к конкретным языкам

программирования, позволяет конфигурировать информационную систему под актуальные требования. Пример и компоновки структуры ИС для создания широкого класса тематических сервисов приведен на рисунке 1.



Рис. 1. Структурно-функциональная схема ИС

Важнейшими отличительными особенностями ИС, обеспечивающими комплексную автоматизацию задач обработки данных, моделирования и предоставления тематических сервисов пользователям по принципу «одного окна», являются наличие в составе ИС модулей заказа и каталогизации космических снимков, а также применение языка исполнения бизнес-процессов (Business Process Execution Language, BPEL). BPEL позволяет организовать логику взаимодействия модулей и веб-сервисов при решении каждой конкретной прикладной задачи, используя, в том числе, визуальный редактор. Тем самым обеспечивается простое визуальное формирование алгоритмов работы системы с задействованием различных источников и сервисов и масштабирование состава предоставляемых услуг по принципу «конструктора».

Результаты

В настоящее время в СПИИРАН реализованы все основные компоненты ИС, показанные на рис. 1, включая модули заказа и каталогизации космической съёмки, реализующие процедуры обработки данных ДЗЗ, поступающих с КА Ресурс-П 1, 2, 3 КШМСА, ГЕОТОН, Гиперспектр; Канопус-В и БКА. Состав формируемых тематических сервисов включает в настоящее время более 20 наименований (в том числе лесопользование, сельское хозяйство, чрезвычайные ситуации, и т.д.) и постоянно увеличивается. Сервисы основаны на использовании материалов съёмок как российских, так и зарубежных КА ДЗЗ.

В частности, на рис. 2 приведен вид интерфейса пользователя при решении задачи анализа динамики изменений растительного покрова на территории Государственного заказника «Березовые острова» в Ленинградской области за период 2001–2019 гг. Разработанный веб-сервис обеспечивает просмотр происходящих изменений на заданном участке территории за интересующий пользователя интервал времени. Для этого в интерфейс пользователя встроена временная шкала, и передвижение слайдера этой шкалы позволяет задать необходимый временной интервал анализа. Выявление изменений проведено на основе обработки данных КА системы Landsat.

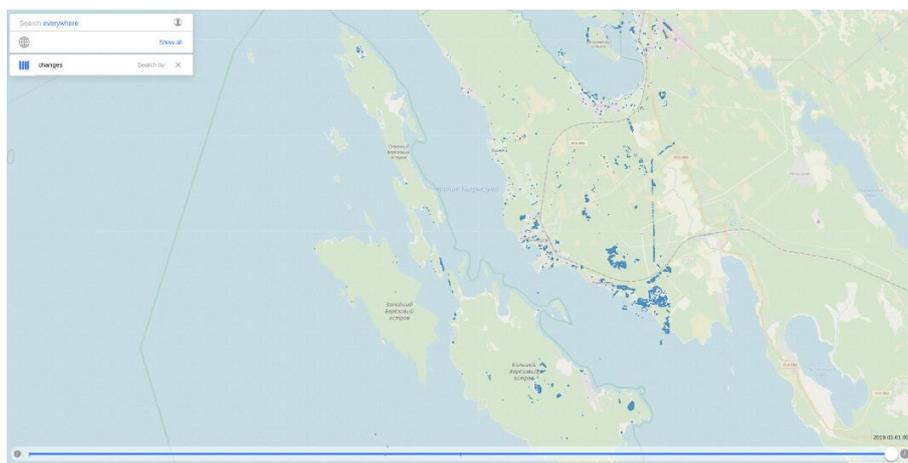


Рис. 2. Вид интерфейса пользователя ИС при просмотре динамики происходящих изменений за период 2001–2019 гг.

Другим примером является использование ИС для анализа негативных последствий лесных пожаров. На рис. 3 приведен вид интерфейса пользователя при использовании сервиса анализа динамики лесных пожаров на приграничной территории Юго-Восточной Финляндии и Ленинградской области, а также автоматического определения характеристик гарей в лесных массивах по данным ДЗЗ с КА Sentinel-2. Здесь также используется временная шкала для просмотра данных за интересующий пользователя интервал времени.



Рис. 3. Вид интерфейса пользователя ИС при анализе динамики произошедших лесных пожаров и выявлении гарей (данные о лесных пожарах – сервис <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>; снимок Sentinel-2 от 25.11.2019; полевые исследования, методика выявления гарей и фото – Мочалов В.Ф.)

Примером, наиболее полно характеризующим преимущества предложенного подхода к созданию ИС для междисциплинарных разработок, является созданный сервис анализа гидрологической обстановки и оперативного прогнозирования речных наводнений [24]. Разработанный вариант ИС обеспечивает загрузку данных с гидропостов (уровни и расходы воды на анализируемых участках речного русла), метеоданных, обеспечивает взаимодействие с комплексом гидрологических и гидродинамических моделей, загрузку и визуальный мультивременной анализ необходимых данных ДЗЗ (оптических и радиолокационных), интерпретацию и визуализацию результатов оперативного (на 12–48 часов) прогнозирования контуров и глубин зон затопления, выявление объектов инфраструктуры, попадающих в зоны затопления, оповещение заинтересованных лиц. Отличительными особенностями ИС являются полностью автоматический режим работы, а также комплексное использование данных ДЗЗ оптического и радио диапазонов с КА «Ресурс-П», семейств Sentinel и Radarsat.

Система успешно прошла апробацию в период весенних паводков на реке Даугава (Латвия), а также на участке реки Северная Двина (Россия) от г. Великий Устюг до г. Котлас. При этом прогноз затопления объектов инфраструктуры совпал с реальными данными не менее чем на 90–95%. Вид интерфейса пользователя ИС приведен на рис. 4. В нижней части экрана расположена временная шкала, передвигая слайдер которой пользователь может проводить анализ изменения гидрологической обстановки за интересующий его интервал времени, а также просмотреть результаты прогноза. На рис. 5 показано использование результатов космической съемки для верификации результатов моделирования.

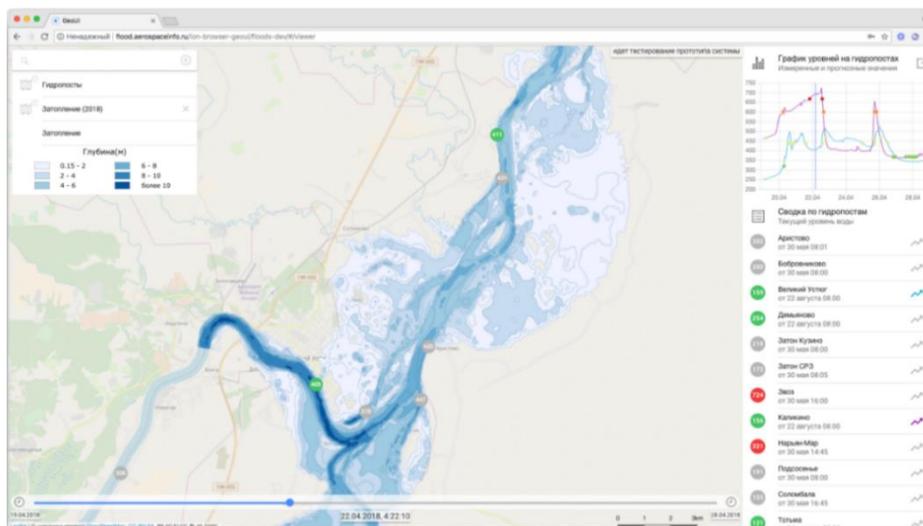


Рис. 4. Пользовательский интерфейс ИС

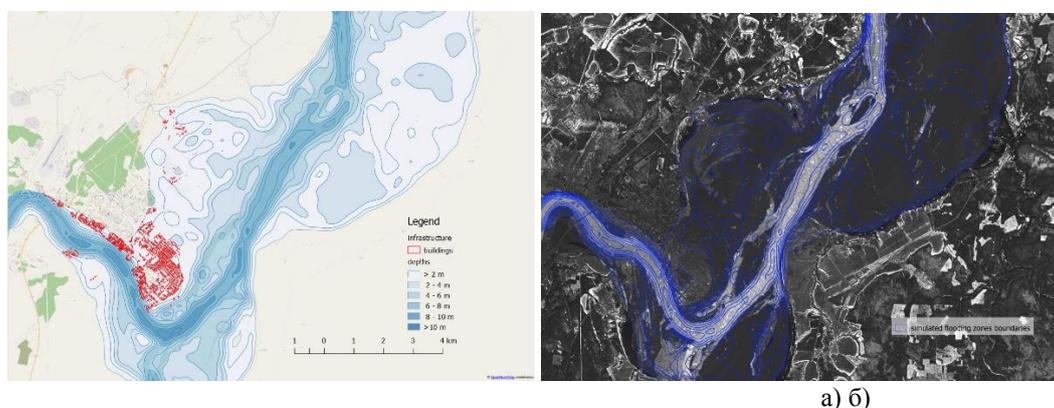


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования (а) с актуальными границами зон затоплений (б) (снимок с А «Ресурс-П» от 18.04.2016)

Выводы

Эффективным способом решения проблемы интеграции распределенных информационных ресурсов является использование сервис-ориентированной и событийно-ориентированной архитектуры в сочетании с технологиями платформенно-независимого универсального описания, автоматического поиска и интеграции веб-сервисов, как базового подхода к созданию соответствующих информационных систем. Результаты реализации данного подхода для решения междисциплинарных задач создания тематических сервисов с использованием данных ДЗЗ показывают, что при его использовании обеспечивается выполнение основных требований к таким системам, в том числе максимальная автоматизация решаемых задач и удобство для пользователя. В целом, разработанная ИС представляет собой достаточно универсальный конструктор, который позволяет создавать удобные инструменты поддержки принятия решений в различных предметных областях, в том числе в области экологии и защиты окружающей среды, лесопользования, мониторинга и прогнозирования ЧС, и др.

Исследования, выполненные по представленной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№ 17-06-00108, 18-07-01272, 18-08-01505, 19-08-00989, 20-08-01046), в рамках бюджетной темы №№0073-2019-0004, проекта «Инновационные информационные технологии для анализа негативного воздействия на леса приграничного региона (KS1309 InnoForestView)» Программы приграничного сотрудничества «Россия – Юго-Восточная Финляндия 2014-2020». Исследования по созданию системы для прогнозирования наводнений выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 17-11-01254.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sokolov, B., Zelentsov, V.A., Nemykin, S. (2016). Conceptual and Formal Modelling of Monitoring Systems Structure-Dynamics Control // Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems. Volume 466. P. 391–401.
2. Sokolov, Boris, Okhtilev, Mikhail, Potryasaev, Semyon, Merkurjev, Yuri. Multi-model Description of Monitoring and Control Systems for Natural and Technological Objects // Information Technology and Management Science, Volume 16, Issue 1. P. 11–17.
3. Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов / М.: РАН, 2019, 314 с.
4. Геоаналитика.Агро. URL: <http://agro.geoanalitika.com/ru/>.
5. Карта пожаров. URL: <https://fires.ru/>.
6. Портал морских сервисов. URL: <https://maritime.earth/>.
7. КосмосАгро. URL: <http://www.scanex.ru/cloud/kosmosagro/>.
8. Геоинформационные решения на основе анализа данных дистанционного зондирования, разработанные компанией «ТерраТех». URL: <https://terratech.ru/services/>.
9. ВЕГА-PRO. URL: <http://pro-vega.ru/descriptions.sht>.
10. Арктический портал SIOWS (Storm Ice Oil Wind Wave Watch System). URL: <http://siows.solab.rshu.ru/>.
11. Сервис визуализации данных дистанционного зондирования океана SATIN. URL: <http://satin.rshu.ru/>.
12. Copernicus Land Monitoring Service. URL: <http://copernicus.eu/main/land-monitoring>.
13. Copernicus Emergency Management Service. URL: <http://emergency.copernicus.eu/>.
14. Copernicus Atmosphere Monitoring Service. URL: <http://atmosphere.copernicus.eu/>.
15. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. URL: <http://marine.copernicus.eu/>.
16. Copernicus Climate Change Monitoring Service. URL: <http://climate.copernicus.eu/>.
17. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). URL: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>.
18. LandViewer. URL: <https://eos.com/landviewer>
19. European Space Agency Thematic Exploitation Platforms (ESA TEPs). URL: <https://eo4society.esa.int/platform-services/>.
20. Copernicus Data and Information Access Services (DIAS). URL: <https://www.copernicus.eu/en/access-data/dias>.
21. Copernicus Research and User Support (RUS) Service. URL: <https://rus-copernicus.eu/portal/>.
22. Советов Б.Я., Водяхо А.И., Дубенецкий В.А., Цехановский В.В. Архитектура информационных систем / М.: Издательский центр «Академия», 2012. 288 с.
23. Paik H., Lemos A., Barukh M., Benatallah B., Natarajan A. Web Service Implementation and Composition Techniques / Springer International Publishing, 2017. 256 p.
24. Зеленцов В.А. и др. Модельно-ориентированная система оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник РАН. 2019, том 89, №8. С. 831–843 (В.А. Зеленцов, А.М. Алабян, И.Н. Крыленко, И.Ю. Пиманов, М.Р. Пономаренко, С.А. Потрясаев, А. Е. Семенов, В.А. Соболевский, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов).

**Зеневич С.Г.^{1,2*}, Газизов И.Ш.^{1,2}, Чурбанов Д.В.¹,
Спиридонов М.В.^{1,2,3}, Родин А.В.^{1,2}**

Проект компактного гетеродинного спектрометра для дистанционного зондирования парниковых газов атмосферы Земли

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9
*E-mail: zenevich09@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Россия, 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

В работе описан проект многоканального лазерного гетеродинного спектрометра (МЛГС) для зондирования верхних слоев атмосферы Земли в трех спектральных диапазонах 1,26 мкм, 1,43 мкм и 1,64 мкм. Цель проекта – исследование структуры атмосферы, путем измерения вариаций основных парниковых газов: CO₂, H₂O, O₂ и CH₄ в диапазоне высот 20–85 км, а также исследование динамики атмосферы, путем измерения скорости зональных потоков верхних слоев атмосферы. В работе сделан упор на технические характеристики МЛГС, а также на ожидаемые экспериментальные результаты.

Ключевые слова: парниковые газы; инфракрасный; гетеродинная спектроскопия; CubeSat; солнечное затмение.

**Zenevich S.G.^{1,2*}, Gazizov I.Sh.^{1,2}, Churbanov D.V.¹, Spiridonov M.V.^{1,2,3},
Rodin A.V.^{1,2}**

A project of compact heterodyne spectroradiometer for greenhouse gases remote sensing

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia
*E-mail: zenevich09@mail.ru

²Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI), 84/32 Profsoyuznaya Str, Moscow, 117997, Russia

³Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 38 Vavilova Str, Moscow, 119991, Russia

This work presents a project of multichannel laser heterodyne spectroradiometer (MLHS) for remote sensing of atmospheric upper layers within spectral ranges: 1.26 μm, 1.43 μm, and 1.64 μm. Purposes of the project are to investigate the atmospheric structure by direct measurements of the variability of greenhouse gases CO₂, H₂O, O₂, and CH₄ in the range of altitudes of 20–85 km, and to research dynamics of the atmosphere by measuring the speed of zonal flows of the upper layers of the atmosphere. The work focuses on the technical characteristics of the MLHS, as well as on the expected experimental results.

Keywords: greenhouse gases; infrared; heterodyne spectroscopy; CubeSat; solar occultation.

Введение

Дистанционное зондирование верхних слоев атмосферы Земли (ДЗЗ) с высоким спектральным и пространственным разрешением является важной научной задачей. Реализация измерений в режиме ДЗЗ обладает преимуществом в сравнении с наземными измерениями, так как в относительно короткий срок

можно получить полную картину глобального распределения исследуемого параметра атмосферы. Данные ДЗЗ используются во многих отраслях деятельности человека: в мониторинге состояния окружающей среды, моделировании климата, прогнозе погоды, управлении низкоорбитальными космическими аппаратами и вычислении времени их существования на орбите. Мониторинг состояния окружающей среды осуществляется путем непрерывного измерения глобального распределения концентрации парниковых газов (ПГ) в столбе атмосферы, в то время как измерения вертикальных профилей давления, температуры и плотности атмосферы, а в равной степени и скорости динамических потоков атмосферы используются для прогноза погоды и учитываются при управлении низкоорбитальными аппаратами. На протяжении более 10 лет ПГ измеряются двумя орбитальными аппаратами – GOSAT и OCO-2. GOSAT – Фурье спектрометр, измеряющий интегральные концентрации CO₂, H₂O, CH₄, O₂, O₃ в видимом, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах в режиме надира на солнечно-синхронной орбите [1]. OCO-2 – дифракционный спектрометр, который измеряет CO₂ и O₂ в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах в том же режиме как и в случае GOSAT [2]. Данные орбитальные миссии успешно справились со своими задачами, далее были запущены аппараты GOSAT-2 и OCO-3 с незначительными изменениями и доработками для продолжения исследования вариаций концентрации ПГ в атмосфере [3, 4]. Отличная применимость Фурье спектрометрии и дифракционной спектроскопии для дистанционного зондирования атмосферы Земли и планет земной группы солнечной системы была продемонстрирована в ряде миссий: GOSAT, OCO-2, SCIAMACHY, Mars-Express, ExoMars 2016, и Venus-Express [1, 2, 5, 6, 7, 8]. Однако данные методы, в приложении ДЗЗ, обладают сравнительно невысоким спектральным разрешением порядка 0,2 см⁻¹, значительной стоимостью и большим габаритами измерительной аппаратуры. Низкое спектральное разрешение ограничивает количество информации, которое можно извлечь из данных при постобработке. Увеличение спектрального разрешения в рассматриваемых случаях возможно лишь за счет увеличения габаритов прибора, что приводит к увеличению стоимости миссии и сокращению её энергоэффективности.

Гетеродинная спектроскопия позволяет проводить ДЗЗ со сверхвысоким спектральным разрешением порядка $\lambda/\delta\lambda \sim 107$. Подобное разрешение, позволяет изучать не только структуру атмосферы, но и её динамику [9], сохраняя при этом компактность и низкую стоимость измерительного оборудования, т.е. возможность реализации недорогого орбитального аппарата форм-фактора CubeSat 6U. Применение гетеродинной спектроскопии для задач ДЗЗ рассматривается не впервые, например, в работе [10] группа авторов представила описание гетеродинного спекторорадиометра ИК диапазона для измерения атмосферного CO₂ и CH₄ и изотопного соотношения $\delta^{13}\text{C}\text{H}_4$ в диапазоне высот 10–55 км. Данная работа примечательна тем, что измерения проводятся в двух спектральных диапазонах: ближнем и среднем ИК, при этом в ближнем ИК диапазоне реализована многоканальная схема приема гетеродинного сигнала на основе балансных детекторов. Другая группа разработчиков представила подробный технический проект одноканального гетеродинного спекторорадиометра ближнего ИК диапазона для одновременного измерения CO₂, H₂O и CH₄ в диапазоне высот 6–35 км [11]. Последний проект представляет не самый оптимальный спектральный диапазон для ДЗЗ, обеспечивающий малый охват тангенциальных высот. Широкая полоса приемника ~ 5 ГГц обуславливает более низкое спектральное разрешение, и как следствие приводит к потере информации о динамике атмосферы.

Данная работа посвящена описанию проекта недорогого и компактного многоканального лазерного гетеродинного спекторорадиометра (МЛГС) сверхвысокого разрешения для исследования структуры и динамики верхних слоев атмосферы с орбиты Земли.

Экспериментальная измерительная аппаратура

Основные принципы и методы реализации гетеродинного приема излучения в ближнем ИК диапазоне описаны в предыдущих работах нашей группы [9, 12], здесь мы остановимся лишь на конфигурации аппарата и ожидаемых экспериментальных результатах. МЛГС работает в режиме солнечных затмений, т.е. регистрирует прямое солнечное излучение, прошедшее через атмосферу. Научная задача аппарата – измерение в ближнем ИК диапазоне в окне высот 20–85 км следующих характеристик атмосферы: плотности атмосферы, интегральной концентрации CO₂, H₂O, O₂ и CH₄, их вертикального распределения, а также вертикального профиля проекции скорости ветра, измеренной вдоль направления наблюдения Солнца.

Сверхвысокое спектральное разрешение гетеродинной спектроскопии $\lambda/\delta\lambda \sim 107$ позволяет анализировать полностью разрешенный контур отдельной вращательной линии колебательного спектра исследуемого газа. Однако, данный метод обладает некоторыми недостатками, например, сложностью

восстановления базовой линии и узким охватываемым спектральным диапазоном. В случае МЛГС спектральный диапазон расширен за счет использования трех лазеров для одновременного измерения четырех вышеперечисленных ПГ.

Принципиальная схема МЛГС представлена на рис. 1. МЛГС имеет три одинаковых измерительных блока для одновременного измерения ПГ следующим образом:

- 1) измерение O_2 в окрестности 1,26 мкм, в диапазоне 7908,8 – 7909,8 cm^{-1} ;
- 2) измерение H_2O и CO_2 в окрестности 1,43 мкм, в диапазоне 6954,9 – 6956,7 cm^{-1} ;
- 3) измерение CH_4 и CO_2 в окрестности 1,64 мкм, в диапазоне 6086,2 – 6087,6 cm^{-1} .

В качестве локальных осцилляторов используются перестраиваемые диодные РОС лазеры с одномодовым волоконным выводом и вмонтированными внутрь корпуса термоэлементом Пельтье и термистором. Одномодовые кварцевые разветвители используются для разделения лазерного излучения между измерительными каналами и совмещения волновых фронтов смешиваемых сигналов лазерного и солнечного излучений. Солнечное излучение попадает в оптическую систему с помощью системы волоконных коллиматоров. Каждый из трех измерительных блоков состоит из пяти каналов: четыре канала для измерения аналитического гетеродинного сигнала, и один опорный канал.

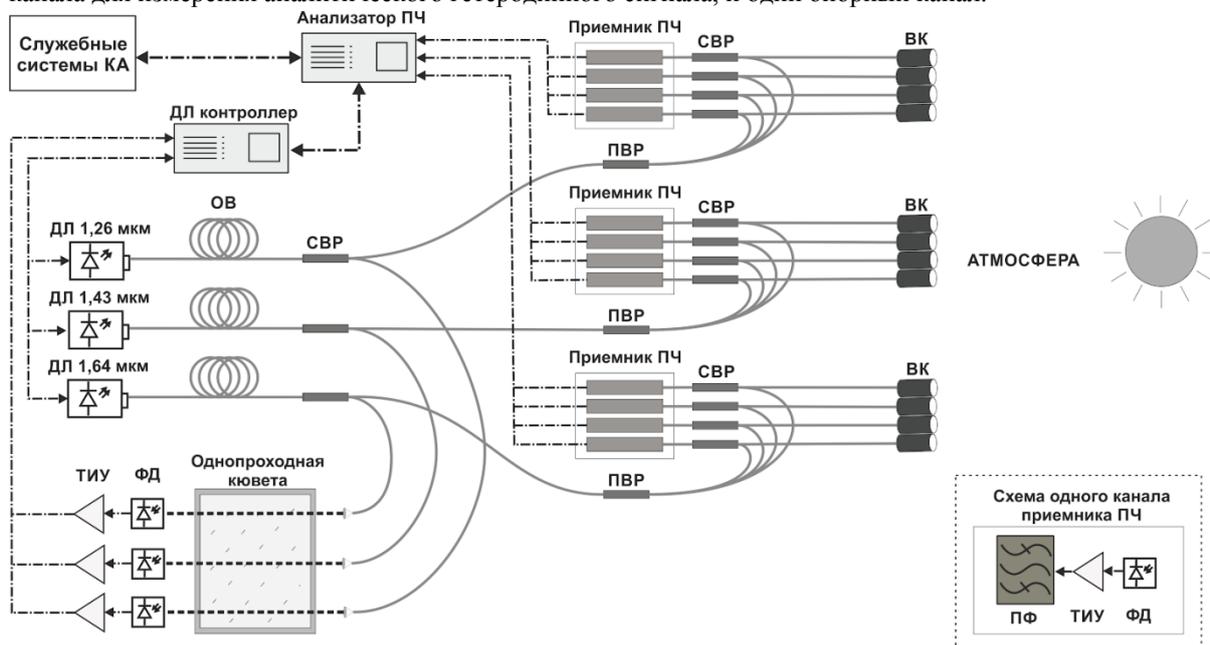


Рис. 1. Принципиальная схема МЛГС для зондирования верхних слоев атмосферы в режиме солнечного затмения. ДЛ – диодный лазер; ОВ - одномодовое оптическое волокно; СВР – сварные волоконные разветвители; ПВР – планарные волоконные разветвители; ВК – волоконный коллиматор; ФД – фотодиод; ТИУ – трансимпедансный усилитель; ПФ – полосовой фильтр; КА – космический аппарат.

Серые сплошные линии – одномодовое оптическое волокно. Черные пунктирные линии – открытый оптический сигнал. Пунктирные с точкой линии – электронный сигнал

Необходимость применения многоканальной структуры приемника гетеродинного сигнала при работе в режиме солнечных затмений диктуется ограниченным временем наблюдения солнца через слои атмосферы. Эта величина зависит от конфигурации орбиты и времени года. В нашем случае время наблюдения составляет около 70 секунд. Опорные каналы представляют собой однопроходную кювету (одна кювета для трех лазеров) длиной 5 см, заполненную смесью CH_4 , HF и NH_3 при 50 мбар с индивидуальной системой ввода излучения и блока регистрации сигнала для каждого блока. Данный канал используются для высокоточной стабилизации частоты лазеров посредством реализации обратной связи между током накачки лазера и пиком наблюдаемого поглощения на основе применения пропорционально-интегрального регулятора. В случае аналитических каналов смешанный сигнал лазерного и солнечного излучений регистрируется приемником промежуточных частот (ПЧ), который состоит из быстрого p-i-n фотодиода, трансимпедансного усилителя и системы дополнительного усиления и фильтрации сигнала в полосе ПЧ от 200 кГц до 20 МГц. Биения анализируются блоком обработки сигнала ПЧ на основе ПЛИС. Дневной объем данных составляет не более 12 Мбайт, которые передаются в наземный центр управления с помощью транспондера X-диапазона.

Использование телекоммуникационных компонент входящих в состав прибора позволяет реализовать компактное и недорогое инженерное решение описываемой миссии на основе стандарта CubeSat 6U. Вес космического аппарата (КА) вместе с полезной нагрузкой не превышает 10 кг, что позволяет воспользоваться существующими экономичными методами для выведения аппарата на орбиту. КА включает в себя модуль питания, канал радиосвязи, модуль контроля ориентации и полезную нагрузку. Пиковая мощность потребления КА не превышает 50 Вт. Для успешного проведения наблюдений необходимо наведение аппарата на Солнце модулем контроля ориентации с точностью менее 10° .

Ожидаемые результаты

В работе рассматривается функционирование КА на орбите МКС. Как уже было отмечено ранее время сканирования столба атмосферы в режиме солнечных затмений на рассматриваемой орбите составит 70 секунд. На основе результатов лабораторных исследований, которые были получены на наземном прототипе МЛГС, с помощью применения четырех измерительных каналов и использования приемника ПЧ с полосой 0,2 – 20 МГц возможно достижение значения отношения сигнал/шум 300 за ~ 10 секунд накопления сигнала.

Синтетические ожидаемые спектры пропускания атмосферы в трех выбранных спектральных диапазонах представлены на рис. 2. Диапазон охватываемых тангенциальных высот приведен в легенде для каждого спектрального диапазона. Спектры пропускания были рассчитаны на основе сферической модели атмосферы без учета рассеяния. Параметры спектральных линий были взяты из базы данных HITRAN 2016 [13], а профили давления и температуры из открытых баз ERA-INTERIM и NCEP/NCAR [14, 15].

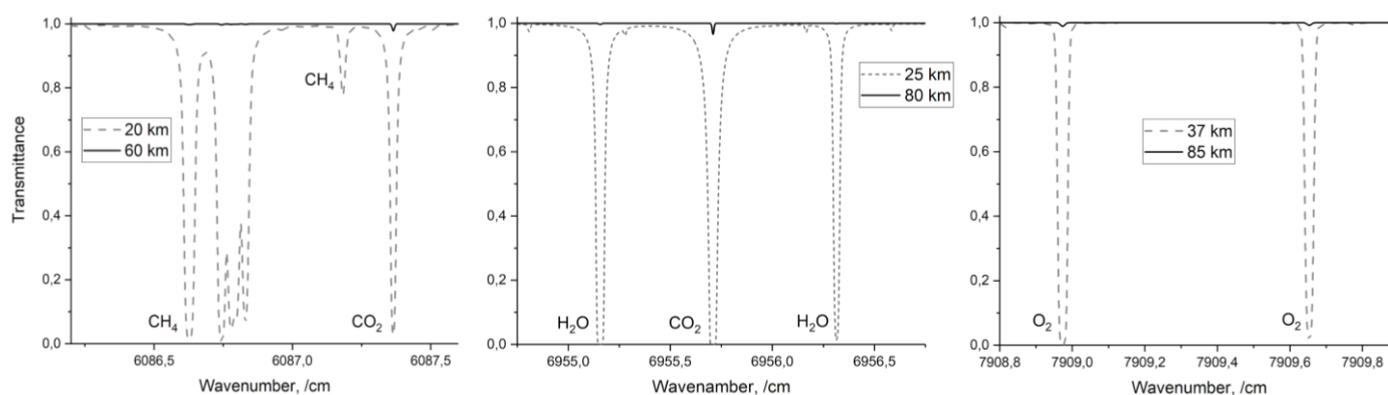


Рис. 2. Синтетические ожидаемые спектры пропускания атмосферы Земли в окрестностях длин волн 1,26 мкм, 1,43 мкм и 1,64 мкм для детектирования атмосферных CO_2 , H_2O , O_2 и CH_4 . Диапазон тангенциальных высот приведен в легенде на каждом графике. Для адекватной интерпретации результатов моделирования в черно-белой цветовой гамме здесь приведены спектры пропускания лишь для минимальной и максимальной тангенциальных высот доступных в каждом спектральном диапазоне

В ранних работах нашей группы были продемонстрированы результаты, которые могут быть получены только с помощью применения сверхвысокого разрешения гетеродинной спектроскопии. В частности, в работе [16] приведена методика восстановления вертикального распределения CH_4 , а в работе [9] описан метод вычисления вертикального профиля проекции скорости ветра вдоль луча зондирования. Подобные результаты рассчитываются на основе полностью разрешенного контура линии поглощения анализируемого газа в измеренном спектре пропускания атмосферы. Однако, в случае орбитального проведения измерений в режиме солнечных затмений данные методики решения обратной задачи использоваться не планируются. Пространственная информация о содержании ПГ в столбе будет реализована за счет последовательного измерения серии спектров пропускания на разных высотах, а информация о динамике атмосферы, в частности о скорости зонального ветра верхних слоев атмосферы, будет реализована за счет детектирования доплеровского смещения контура линии целиком на каждой определенной высоте.

Заключение

В работе представлен проект многоканального гетеродинного лазерного спектрометра (МЛГС) на платформе стандарта CubeSat 6U для исследования динамики и структуры верхних слоев

атмосферы в ближнем ИК диапазоне. Данный проект обладает высоким потенциалом, так как выбранные спектральные диапазоны охватывают сразу 4 важных парниковых газа CO₂, H₂O, O₂ и CH₄, а метод измерения позволяет получать данные не только об интегральном содержании ПГ в столбе атмосферы и их вертикальном распределении, но и о вертикальном профиле зонального ветра. Реализация данного проекта будет полезна для составления карт глобально распределения ПГ и исследования их вклада в глобальное потепление, а также для задач метеорологии, в частности, для составления краткосрочного прогноза погоды в охватываемых КА областях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 19-32-90276 (Зеневиц С.Г.)) и (№ 19-29-06104 (Родин А.В., Газизов И.Ш., Спиридонов М.В.)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring / A. Kuze, H. Suto, M. Nakajima, T. Hamazaki // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. № 35. P. 6716–6733.
2. The Orbiting Carbon Observatory-2: first 18 months of science data products / A. Eldering, C.W. O'Dell, P.O. Wennberg, et al. // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 549–563.
3. Information content analysis: the potential for methane isotopologue retrieval from GOSAT-2 / E. Malina, Y. Yoshida, T. Matsunaga, J.-P. Muller // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11. P. 1159–117.
4. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data / A. Eldering, T.E. Taylor, C.W. O'Dell, R. Pavlick // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 2341–2370.
5. Retrieval of atmospheric CO₂ with enhanced accuracy and precision from SCIAMACHY: Validation with FTS measurements and comparison with model results / M. Reuter, H. Bovensmann, M. Buchwitz, J.P. Burrows et al. // *Journal of Geophysical Research.* 2011. V. 116. P. D04301.
6. Evidence of Water Vapor in Excess of Saturation in the Atmosphere of Mars / L. Maltagliati, F. Montmessin, A. Fedorova, O. Korablev, F. Forget, J.-L. Bertaux // *Science.* 2011. V. 333. № 6051. P. 1868–1871.
7. ACS experiment for atmospheric studies on “ExoMars-2016” Orbiter / O.I. Korablev, F. Montmessin, A.A. Fedorova et al. // *Sol Syst Res.* 2015. V. 49. № 7. P. 529–537.
8. Venus Express — The first European mission to Venus / H. Svedhem, D.V. Titov, D. McCoy, J.-P. Lebreton et al. // *Planetary and Space Science.* 2007. V. 55. № 12. P. 1636–1652.
9. Vertical wind profiling from troposphere to the lower mesosphere based on high resolution heterodyne near-infrared spectroradiometry / A.V. Rodin, D.V. Churbanov, S.G. Zenevich, A.Yu. Klimchuk et al. // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2019. in review.
10. The Methane Isotopologues by Solar Occultation (MISO) Nanosatellite Mission: Spectral Channel Optimization and Early Performance Analysis / D. Weidmann, A. Hoffmann, N. Macleod, K. Middleton et al. // *Remote Sensing.* 2017. V. 9. № 10. P. 1073.
11. A 4 U laser heterodyne radiometer for methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) measurements from an occultation-viewing CubeSat / E.L. Wilson, A.J. DiGregorio, V.J. Riot, M.S. Ammons et al // *Measurement Science and Technology.* 2017. V. 28. P. 035902.
12. Measurements of the fully resolved contour of the carbon dioxide absorption line in a band at $\lambda = 1.605$ mm in the atmospheric column using high-resolution heterodyne spectroradiometry method / S.G. Zenevich, A.V. Rodin, D.V. Churbanov, A.Yu. Klimchuk et al. // *Quantum Electron.* 2019. V. 49. № 6. P. 604–611.
13. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database / I.E. Gordon, L.S. Rothman, C.Hill, R.V. Kochanov et al. // *JQRT.* 2017. V. 203. P. 3–69.
14. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D.P. Dee, S.M. Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford et al. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137. P. 553–597.
15. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins et al. // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 1996. V. 77. № 3. P. 437–471.
16. High resolution heterodyne spectroscopy of the atmospheric methane NIR absorption / A. Rodin, A. Klimchuk, A. Nadezhdinskiy, D. Churbanov, M. Spiridonov // *Opt. Express.* 2014. V. 22. № 11. P. 13825–13834.

**Ковалёнок В.В.¹, Иванченков А.С.², Савиных В.П.³, Баранова Л.А.⁴,
Авакян С.В.^{5*}**

**Земля и Космос: возможности пилотируемой космонавтики
при решении проблем климатологии и безопасности
внемагнитосферных миссий**

¹Федерация космонавтики России
Россия, 127018, Москва, 3 пр. Марьиной рощи, 40

²ОАО РКК Энергия им. С.П. Королёва
Россия, 141070, г. Королёв Московской обл.

³Московский институт инженеров геодезии, аэросъёмки и картографии
Россия, 103064, Москва, Гороховский пер., 4

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской Академии наук
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

⁵Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научный центр
«Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,
Россия, 199034, Санкт-Петербург, линия Биржевая, 12
*E-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

Рассмотрены вклад и потенциальные возможности космонавтов-наблюдателей в исследования окружающей среды на основе многолетнего опыта отечественной космонавтики. Уточнена программа исследований по изменчивости климата с учётом вариаций солнечно-геомагнитной активности, с включением в рассмотрение водяного пара как главного парникового газа, с предложениями по воздействию на облачность. Обсуждены вопросы безопасности орбитальных и внегеомагнитосферных миссий, включая экспедиции по эксплуатации Луны и к Марсу.

На основе проведённых исследований представлены следующие результаты:

- о реальном вкладе активности Солнца и магнитных бурь в зарегистрированные ранее характеристики глобального облачного покрова, вариации общего содержания водяных паров в столбе атмосферы и в вариации температуры и давления нижней тропосферы;

- о потенциальных рисках воздействия на космонавтов факторов космического полёта вне магнитосферы Земли, с предложениями по способам их прогноза.

Интерпретация полученных результатов основана на квантово-механических оценках в рамках физической оптики для надмолекулярных структур, с привлечением экспериментально обнаруживаемых вариаций потока эмиссионного микроволнового излучения ионосферы Земли, возмущённой в периоды солнечных вспышек и геомагнитных бурь.

Ключевые слова: глобальное потепление, безопасность космонавтов, водосодержащие супрамолекулы.

**Vladimir V. Kovalenok¹, Alexander V. Ivanchenkov², Victor P. Savinykh³,
Lubov A. Baranova⁴ and Sergey V. Avakyan^{5*}**

**Earth and Cosmos: Possibilities of the manned space flights at the decision
of problems of the climatology and safety of out-magnetosphere
space missions**

¹Federation cosmonautics of Russia
127018, Moscow, 3th pasage Marjinoi Rotshi, 40

²S.P. Korolev Rocket Space Corporation "Energia"
Russia, 141070, Korolev, Moscow region

³Moscow Institute of Engineers for Geodesy, Aerial surveying and Cartography
Russia, 103064, Moscow, Gorochovsky, 4

⁴A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of RAS
St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 26

⁵All-Russian Science Center “S.I. Vavilov State Optical Institute”
St. Petersburg, Russia
*E-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

The contribution of cosmonauts observations to environmental studies and the potential of such observations are considered, taking into account the many years of experience in Russian cosmonautics. The research program on climate variability has been refined, taking into account variations in solar-geomagnetic activity, with including in consideration water vapor as the main greenhouse gas and with suggestions on the influence on cloud cover. The issues of safety of orbital and out-geomagnetospheric missions, including expeditions to exploit the Moon and to Mars, are discussed.

Based on the conducted research, the following results are presented:

- about the real contribution of the activity of the Sun and magnetic storms to previously recorded characteristics of the global cloud cover, to variations in the total content of water vapor in the atmospheric column and to variations in temperature and pressure of the lower troposphere;
- about the potential risks of cosmonauts exposure to the space flight factors outside the Earth's magnetosphere, with suggestions on how to forecast them.

The results were interpreted on the basis of quantum-mechanical estimates in the framework of the physical optics of supramolecular structures, using experimentally detectable variations in the microwave flux of the Earth's ionosphere disturbed during periods of solar flares and geomagnetic storms.

Keywords: global warming, safety of cosmonauts, water supramolecules.

Введение

Комплексные исследования в системе «Геокосмос – Земля – атмосфера» могут быть существенно развиты при использовании возможностей космонавтов-наблюдателей с учётом многолетнего опыта отечественной космонавтики. Это позволит решить задачу повышения эффективности деятельности космонавтов на Международной космической станции (МКС) в ответ на новые вызовы в устойчивом развитии, угрозы крупномасштабных экологических катастроф и реалии глобального потепления климата [1–3]. Предлагается уделить больше внимания работе космонавтов на МКС по программе [4] визуально-инструментальных наблюдений (ВИН) оптических явлений в ионосфере при регистрации воздействий на нижнюю атмосферу факторов усиления активности Солнца [5–10]. Для этого учитываются результаты исследований [11] по гелиогеофизическим воздействиям на процессы ассоциатообразования с участием молекул воды в нижней атмосфере с образованием дымки.

Основными целями данной работы являются:

- 1) Представление результатов исследований по изменчивости климата с учётом вклада текущей вариации солнечно-геомагнитной активности, при включении в рассмотрение тропосферного водяного пара – главного парникового газа, и предложений по искусственному воздействию на погодно-климатические характеристики;
- 2) Выявление проблем безопасности космонавтов при внегеомагнитосферных полётах, включая экспедиции по эксплуатации Луны, к Марсу и астероидам.

В задачи исследований входило:

- показ определяющего вклада вариаций уровня солнечно-геомагнитной активности в данные известных международных спутниковых измерений глобальной распространённости облачного покрова и при регистрации метеопараметров в высокогорных наблюдениях;
- развитие предложений по обеспечению безопасности космических полётов вне магнитосферы с учётом новых результатов по биофизике и солнечно-земной физике.

Вклад активности Солнца и магнитных бурь в погодно-климатические характеристики

Как известно, реальные причины наблюдаемого в современную эпоху явления глобального потепления так практически и не определены. Существующие модели, предложенные на основе парникового эффекта на углекислом газе и других газах-примесях нижней атмосферы, не могут считаться научнообоснованными по причине отсутствия в этом списке водяного пара – главного по парниковым

свойствам тропосферного компонента [12]. Школа академика К.Я. Кондратьева всегда отличалась всесторонним рассмотрением проблем изменения климата: «Какая же может быть наука с консенсусом? Наука развивается только на основе противоречий...» (см. [13], стр. 86). Под руководством Г.А. Никольского, сотрудника К.Я. Кондратьева, уже в середине 1980-х годов были получены экспериментальные доказательства реальности конденсационно-кластерной гипотезы с вкладом активности Солнца в характеристики облачного покрова и вариации общего содержания водяных паров в столбе атмосферы [14, 15]. Так что неудивителен и вывод в [16] о важной роли тонких перистых облаков в формировании радиационного баланса. Позднее [17] опубликованы результаты о снижении атмосферного давления во время сильных солнечных вспышек (в 82 % случаев) и росте температуры после мировых магнитных бурь (в 84 % случаев) на высоте 2100 м, ст. Кисловодск. В [18] отмечено поразительное несоответствие обнаруженного в Международном спутниковом эксперименте ISCCP уменьшения глобальной облачности при одновременном повышении температуры поверхности океана (сопровождающимся увеличением испарения с водной поверхности), существующим представлениям о механизмах образования облаков. Это можно объяснить как раз, по-видимому, только космофизическим воздействием в максимуме текущего векового цикла активности Солнца. Все эти результаты и привели [19, 20] к целенаправленному поиску проявлений роли солнечно-геомагнитной активности в данных эксперимента ISCCP по регистрации вариаций распространённости облачности всех ярусов, а также в изменениях содержания водяного пара в столбе атмосферы для различных точек над земным шаром. Фактором воздействия на водяной пар тропосферы определено [4, 11] микроволновое излучение ионосферы, возмущённой активностью Солнца, величина потока которого доходит до 10^{-11} Вт/см² и более. В [2], с. 543, упоминается, что «Согласно мандату ИРСС, поставленная перед ИРСС задача состоит в том, чтобы подготовить обзор «любых изменений климата со временем, как природно-обусловленных, так и антропогенных»». Степень выполнения этой задачи и серия возникающих вопросов к Отчётам ИРСС обсуждены в [21]. А согласно [19, 20], именно совокупный вековой максимум солнечной электромагнитной (1985 г.) и корпускулярной (1987 г.) активностей [22], а затем (2003 г.) и геомагнитной активности (по количеству мировых магнитных бурь), обеспечил энергетику современного глобального потепления дополнительным вкладом в ~ 7 Вт/м² [19, 20]. Из антропогенных факторов лесосведение и абиотизация суши дали в эти же годы вклад, в сумме оцениваемый в $\sim 6,3$ Вт/м² [13], что в несколько раз превосходит оценку ИРСС от парникового эффекта на углеродсодержащих газах (2,63 Вт/м² [21]).

Перспективы ВИН с борта МКС в исследованиях погодно-климатических явлений

Приведённые в [19, 20] результаты позволяют усовершенствовать программу ВИН при регистрации эффектов от вспышек на Солнце и магнитных бурь в зарождении и увеличении распространённости облачного покрова в регионах с антициклонической ситуацией. Опыт таких наблюдений, в том числе за тайфунами и тропическими циклонами, уже представлялся в [23], а затем и в [2], с. 350. Было зафиксировано над океаном в районе Бермудского треугольника после полного отсутствия облачности во всём регионе (с границей на удалении вплоть до 1800–2000 км) появление через несколько часов сплошного поля облаков. В рамках обсуждаемого механизма контроля за зарождением облачности это как раз признак воздействия эффектов повышения солнечно-геомагнитной активности. Систематические наблюдения подобных ситуаций, их привязка к явлениям активности Солнца позволят определить степень контроля распространённости облачности во время вспышек и бурь.

Для управления циклонами в [24] предлагалось направлять из космоса поток микроволнового излучения для воздействия на водяной пар в тропосфере, см. также [3], с. 458. Особое внимание обращалось на перспективность создания как раз оптически-тонкой облачности, т.к. было показано, что даже образование инверсионных следов самолётов может вызвать требуемые возмущения начального состояния циклонов. В [25] более подробно описаны и возможности локального изменения других метеопараметров под искусственно создаваемой оптически-тонкой облачностью. В перспективе не исключено применение по целеуказаниям космонавтов стратосферного аппарата с долговременным автономным полётом (на солнечных батареях), с размещённым на его борту источником микроволн – аналогом ионосферных эмиссий.

Проблемы безопасности пилотируемых космических полётов вне геомагнитосферы

В [26–28] обсуждены первоочередные задачи, решение которых необходимо для обеспечения безопасности пилотируемых полётов и научно-хозяйственной деятельности на Луне, Марсе и, возможно, на астероидах. Главное здесь – исследования недостаточно изучаемой, но совершенно понятной

проблемы: воздействие на психологическое и физиологическое состояния экипажа космонавтов заведомого отсутствия естественных электромагнитных «шумов» земной окружающей среды (в том числе геомагнитных пульсаций [26, 27]), сопровождающих всю эволюцию человечества. В [11, 29, 30] развиты модельные представления о последствиях влияния электромагнитных полей на биорасторы живых организмов, при этом выполнены квантовомеханические оценки эффекта повышенного ассоциатообразования надмолекулярных структур в рамках супрамолекулярной химии, физики и биофизики, с учётом вариаций потока микроволнового излучения ионосферы Земли.

Вторая проблема безопасности внегеомагнитосферных полётов связана с внезапным появлением в потоке солнечных космических лучей энергичных протонов (с энергией более 500 МэВ). В [28] впервые обнаружена возможность предсказания факта генерирования таких протонов в солнечной атмосфере и их прихода к земной поверхности по уменьшению уровня абсолютного потока электромагнитного излучения Солнца – “Total Solar Irradiance”. Открытие этого явления основано на наблюдениях Г.А. Никольского, а затем подтверждено в более, чем 80 % событий на двадцатилетнем интервале результатов международных экспериментов.

Заключение

С борта отечественных пилотируемых космических комплексов наглядно проявились исключительные возможности космонавтов при обнаружении новых явлений в физике солнечно-земных связей, климатологии и экологической безопасности космического полёта. Опыт таких исследований с использованием ВИН, позволяет изложить первоочередные требования к техническому оснащению перспективных пилотируемых комплексов [4]: это – использование панорамного отсека с как минимум, четырьмя иллюминаторами большого диаметра и поворотной бленды, предложенной профессором А.И. Лазаревым, ГОИ [5].

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, гранты № 94-05-16516 и № 10-05-08089.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Перспективы развития цивилизации. Многомерный анализ / Москва, Логос, 2003, 573 с.
2. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф / Москва, Научный мир, 2009, 692 с.
3. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф. Космический мониторинг тропических циклонов / Москва, Научный мир, 2014, 508 с.
4. Ковалёнок В.В., Иванченков А.С., Авакян С.В. Результативность визуально-инструментальных наблюдений в долговременных пилотируемых полётах // Пилотируемые полёты в космос. 2017. №1 (22). С. 1–15.
5. Лазарев А.И., Николаев А.Г., Хрунов Е.В. Оптические исследования в космосе / Ленинград Гидрометеиздат, 1979, 256 с.
6. Лазарев А.И., Коваленок В.В., Иванченков А.С., Авакян С.В. Атмосфера Земли с “Салюта 6” / Ленинград, Гидрометеиздат, 1981, 207 с.
7. Лазарев А.И., Коваленок В.В., Савиных В.П. Визуально-инструментальные наблюдения с “Салюта 6” / Ленинград, Гидрометеиздат, 1983, 136 с.
8. Авакян С.В., Коваленок В.В., Солоницина Н.Ф. Ночная F область ионосферы в периоды вспышек на Солнце / Алма-Ата, Наука, 1984, 150 с.
9. Лазарев А.И., Коваленок В.В., Авакян С. В. Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей / Ленинград, Гидрометеиздат, 1987, 400 с.
10. Авакян С.В., Евлашин Л.С., Коваленок В.В., Лазарев А.И., Титов В.Г. Наблюдения полярных сияний из космоса / Ленинград, Гидрометеиздат, 1991, 229 с.
11. Авакян С.В. Супрамолекулярная физика окружающей среды: климатические и биофизические эффекты // Вестник Российской Академии Наук. 2017. Т. 87. №5. С. 458–466.
12. Смирнов Б.М. Физика глобальной атмосферы / Долгопрудный, Интеллект, 2017, 251 с.
13. Горшков С.П. Причины глобального потепления и усиления нестабильности климата. Возможности противодействия не по сценарию Киотского протокола // Устойчивое развитие: проблемы и перспективы. 2010. Вып.4. Москва, Товарищество науч. изд. КМК. С. 82–103.

14. Никольский Г.А., Шульц Э.О. Спектрально-временные вариации остаточного ослабления в ближней ультрафиолетовой области спектра // Оптика атмосферы. 1991. Т.4. № 9. С. 961–966.
15. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Солнечная активность и климат. 1 Данные наблюдений. Конденсационная и озонная гипотезы // Исследование Земли из космоса. 1995. №5. С. 3–17.
16. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Перистые облака, радиация и климат // Итоги науки и техники, сер. Метеорология и климатология. 1988. Т. 18. 138 с.
17. Avakyan S.V., Voronin N.A., Nikol'sky G.A. Response of atmospheric pressure and air temperature to the solar events in October 2003 // Geomagn. Aeron. 2015. V.55. N8. P. 1180–1185.
18. Покровский О.М. Изменения облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта // Исследование Земли из космоса. 2019. №1. С. 3–13
19. Авакян С.В. Роль активности Солнца в глобальном потеплении // Вестник Российской Академии наук. 2013. Т. 83. №5, С. 425–436.
20. Авакян С.В. Проблемы климата как задача оптики// Опт. Журн., 2013. Т. 80. №11. С. 98–105. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С. Климатология аэрозолей и облачности. СПб., ВВМ, 2008, 555 с.
21. Lockwood M., Fröhlich C. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature // Proc. R. Soc. A. 2007. V. 463. P. 2447–2460.
22. Коваленок В.В., Родина крылья дала / Минск, Юнацтва, 1989, 239 с.
23. Хоффман Р.Н. Повелевать ураганами: Можно ли бороться с ураганами и другими мощными тропическими циклонами? // В мире науки (Scientific Amer. Rus.). 2005. №1. С. 37–43.
24. Авакян С.В., Воронин Н.А., Троицкий А.В., Черноус С.А. Управление погодой и проблемы безопасности России. Сб. плен. докл. 17 Всер. науч.-техн. конф. «Акт. вопросы защ. и безоп.» СПб.: ВМА, 2014, С.116–121.
25. Доклад (С5.1-025-14), 40-я Научн. Ассамблея КОСПАР, М., 2014.
26. Коваленок В.В., Авакян С.В., Боровкова О.К., Воронин Н.А., Космический солнечный патруль и некоторые проблемы пилотируемого полета к Марсу // Оптический журнал. 2006. Т. 72. №8. С. 49–53.
27. Avakyan S.V., Kovalenok V.V., Savinykh V.P., Ivanchenkov A.S., Voronin N.A., Trchounian A., Baranova L.A. The role of a space patrol of solar radiation in the provisioning of the safety of orbital and interplanetary manned space flights // Acta Astronautica. 2015. V. 109. P. 194–202.
28. Avakyan S.V., Gaponov V.A., Nicol'skii G.A., Solov'ev A.A., Possibilities of the forecast of generation of the high energy solar protons for the safety of Mars mission // Acta Astronautica. 2017. V. 135. P. 187–191.
29. Avakyan S.V., Baranova L.A. Molecular protonics and supramolecular chemistry, physics and biophysics – “Invited Lecture” // Book of Abst. of XXI Mendeleev Congress on general and applied chemistry, Symp. of UNESCO, SPb., 2019, V.6, P. 216.
30. Авакян С.В., Баранова Л.А. Влияние электромагнитного излучения окружающей среды на ассоциатообразование в высокоразбавленных водных растворах // Биофизика. 2019. Т. 64. № 1. С. 12–20.

Мателенок И.В. *, Мелентьев В.В.

Моделирование трехмерной структуры растительного покрова тундр для обеспечения спутникового мониторинга опасных явлений и процессов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
*E-mail: igor_matelenok@mail.ru

Рассмотрены вопросы моделирования структуры растительного покрова тундр для обеспечения решения задач анализа и интерпретации спутниковых данных о земной поверхности с целью мониторинга опасных природных и антропогенных явлений и процессов. На основе ранее полученных в ходе полевых изысканий данных о структуре растительности тундр выполнен комплекс экспериментов по моделированию распространения фотосинтетически активной радиации в растительном покрове. Проведен анализ особенностей взаимодействия солнечного излучения с фрагментами покрова разных типов. Выявлены различия в характере распространения фотосинтетически активной радиации для покрова, образованного преимущественно карликовой березой, и сформированного осоками покрова. Величина падения освещенности грунта при появлении над ним слоя растительности колеблется от 20 до 40 % в зависимости от состояния атмосферы и структуры покрова.

Ключевые слова: распределение листьев по углам наклона, распространение солнечного излучения, структура растительного покрова, тундровые экосистемы, угол наклона листа.

Igor V. Matelenok*, Vladimir V. Melentyev

The modelling of the three-dimensional structure of a tundra vegetation cover to support satellite monitoring of hazardous phenomena and processes

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Russia, 190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67 A
* E-mail: igor_matelenok@mail.ru

Issues pertinent to modelling of the structure of tundra vegetation cover to support the analysis and interpretation of land surface data produced by satellites for the purpose of monitoring natural and human-induced hazards are discussed. A set of experiments to simulate the propagation of photosynthetically active radiation in vegetation cover was conducted on the basis of data on the structure of tundra vegetation cover previously obtained during field studies. The analysis of the interaction of solar radiation with the vegetation covers of different types was carried out. Differences were found in the patterns of solar radiation propagation between dwarf birch cover and sedge cover. The value of the illuminance decrease caused by the appearance of vegetation above the ground varies from 20 to 40 percent, depending on the state of the atmosphere and the structure of the cover.

Keywords: leaf angle distribution, leaf inclination angle, solar radiation propagation, tundra ecosystems, vegetation cover structure.

Введение

Оперативный мониторинг опасных природных и антропогенных явлений и процессов в современных условиях предполагает активное применение аппаратуры дистанционного зондирования Земли космического базирования. Однако в силу слабой изученности пространственной структуры ряда компонентов природной среды, таких как грунты и растительность, особенно для высокоширотных территорий, адекватная интерпретация спутниковой информации оказывается затруднена. В рамках отдельных проектов проводятся полевые наблюдения и натурные эксперименты, призванные заполнить этот пробел [3, 6]. Настоящее исследование продолжает серию работ [2, 7], посвященных изучению

структуры растительного покрова тундр и оценке ее влияния на распространение электромагнитных излучений и протекание разнообразных природных и антропогенных процессов.

Исследование направлено на получение данных об экранировании растительным покровом тундр солнечного излучения. Важность такой информации обусловлена тем, что вероятность достижения солнечными лучами грунта в значительной степени определяет интенсивность нагрева его поверхности, характер теплопереноса в его толще, глубину температурных колебаний отдельных слоев [1]. В конечном итоге, от этого во многом зависит как сама возможность проявления опасных процессов (например, связанных с оттаиванием мерзлых толщ), так и, в частности, точность восстановления значений температуры грунта по спутниковым данным. К задачам исследования относится создание на основе собранных данных о структуре растительного покрова его трехмерных моделей, проведение вычислительных экспериментов по оценке пропускания покровом солнечного излучения и определение особенностей взаимодействия с излучением покрова разных типов.

Материалы и методы

Для решения задач исследования использованы обобщенные данные о структуре двух типов растительного покрова тундр (покрова, образованного преимущественно карликовой березой, и покрова с преобладанием осок), полученные авторами в 2016-2017 гг. Источником этих данных стали полевые работы, выполненные с помощью специализированного программно-аппаратного комплекса в границах тундровых участков, расположенных на Европейской территории России: в Ненецком автономном округе в окрестностях Нарьян-Мара и в Мурманской области в окрестностях Териберки [2, 7].

Натурные данные об ориентации фитоэлементов в пространстве в виде распределений листьев по углам наклона далее были аналитически описаны (аппроксимированы) эллипсоидной [5] и повернутой эллипсоидной [8] функциями. На следующем этапе функции с установленными таким образом значениями параметров были использованы для генерации трехмерных моделей разного масштаба.

На основе данных о распределении фитоэлементов по углам наклона с помощью реализованных на языке R программ были созданы и сохранены в формате STL виртуальные модели фрагментов растительного покрова, образованного карликовой березой (модели с индексом «А»), а также покрова с преобладанием осок (с индексом «Б»). Полученные модели были использованы при создании трехмерных сцен в формате 3Ds Max, которые далее задействовались в вычислительных экспериментах.

Комплекс вычислительных экспериментов включал в себя моделирование экранирования излучения слоем растительности по результатам определения значений интегральной функции Росс-Нильсона (G -функции) [4], а также светотехническое моделирование распространения солнечного света в фрагментах растительного покрова с заданными характеристиками при разных атмосферных условиях для двух периодов года. Это позволило получить оценки горизонтальной освещенности лежащей под покровом поверхности грунта и величины коэффициента пропускания излучения растительным покровом.

Результаты

В ходе обработки обобщенных данных о структуре растительного покрова двух типов был сгенерирован набор трехмерных моделей фрагментов покрова, примеры отдельных моделей из которого представлены на рис. 1.

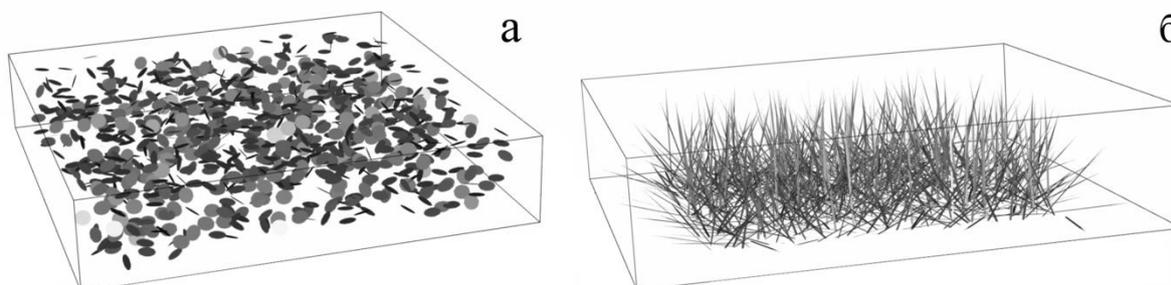


Рис. 1. Примеры моделей фрагментов растительного покрова, а – покров, образованный карликовой березой, б – покров, образованный осоками

В ходе расчетов для рассматриваемых типов покрова был определен вид G -функции, характеризующей зависимость проекции единицы площади листьев, находящихся в единице объема покрова, на плоскость, перпендикулярную направлению распространения излучения, от величины угла θ ,

задающего его отклонение от надира (рис. 2, а). Как видно из представленного изображения, вид полученных зависимостей $G(\theta)$ отличен от широко используемых типовых кривых [9] для сферического и равномерного распределения листьев по углам наклона.

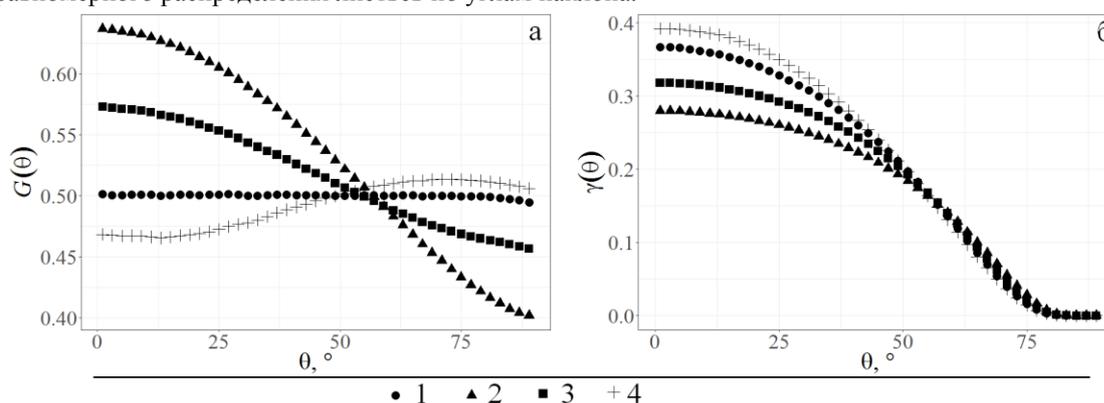


Рис. 2. Зависимость G-функции (а) и коэффициента пропускания солнечного излучения γ растительным покровом (б) от угла падения солнечных лучей θ , 1 – покров с типовым сферическим распределением фитоэлементов по углам наклона, 2 – покров с типовым равномерным распределением фитоэлементов по углам наклона, 3 – покров, образованный карликовой березой, 4 – покров, образованный осоками

Выполненное с помощью программного кода на языке R моделирование проникновения фотосинтетически активной радиации в растительный покров на основе приближения Ламберта-Бера (концепция мутной среды) позволило оценить значения коэффициента пропускания излучения покровом к поверхности грунта (γ). На рис. 2, б представлен вид зависимостей γ от угла падения прямого излучения θ при листовом индексе 2,0. Излучение лучше экранируется покровом, сформированным карликовой березой, чем состоящим из осок. В области больших углов от надира существенную роль играет удлинение пути излучения в покрове, различия в значениях коэффициента для разных типов покрыва оказываются невелики.

Итогом второй части комплекса экспериментов, касающейся моделирования пропускания видимого света и действующей точные трехмерные модели покрыва, стали численные оценки освещенности поверхности грунта (на рис. 3 показаны результаты для фрагментов покрыва с горизонтальными размерами 0,5 * 0,5 м с листовым индексом 2,0).

Как показывают расчеты, в высоких широтах горизонтальная освещенность поверхности грунта в отсутствие растительного покрыва при ясном небе в полуденные часы летом может достигать 75 тыс. лк. Экранирование фрагментом растительного покрыва размером 500*500*120 мм, образованным карликовой березой (модель «А»), уменьшает освещенность в среднем до 50-60 тыс. лк. (рис. 3, а), фрагментом покрыва с преобладанием осок высотой до 230 мм (модель «Б») – до 45-60 тыс. лк (рис. 3, г). В первом случае фиксируются более резкие и глубокие колебания уровня освещенности грунта.

В условиях переменной облачности для модели «А» отмечается уменьшение освещенности в среднем с 30 до 20 тыс. лк (рис. 3, б), при этом направленный характер полей освещенности, имевший место при прямом свете, не обнаруживается. По краям фрагмента покрыва по всем сторонам света отмечается одна и та же картина изменчивости. В противоположность, осоковый покров при таком освещении по-прежнему дает представление о направлении падения прямого света (рис. 3, д), хотя уменьшение освещенности происходит на ту же величину, что и для «А».

При рассеянном свете максимальная освещенность составляет до 20 тыс. лк, а экранирование обоими типами покрыва приводит к ее снижению до 12 тыс. лк (рис. 3, в, е). Структура пространственной изменчивости освещенности соответствует описанной выше для случая переменной облачности.

Более низкое положение солнца над горизонтом в весенние месяцы определяет более четкое выделение направленности полей освещенности для модели «Б» и ее уменьшение с 55 тыс. лк до 30 тыс. лк, что в относительном выражении превосходит падение освещенности для аналогичной сцены в летний период. Аналогичный эффект наблюдается при полностью рассеянном свете и переменной облачности.

Выявленные различия во взаимодействии солнечного излучения с растительным покровом тундр разных типов ставят вопрос о необходимости учета особенностей структуры растительного покрыва при моделировании теплового баланса земной поверхности в высоких широтах.

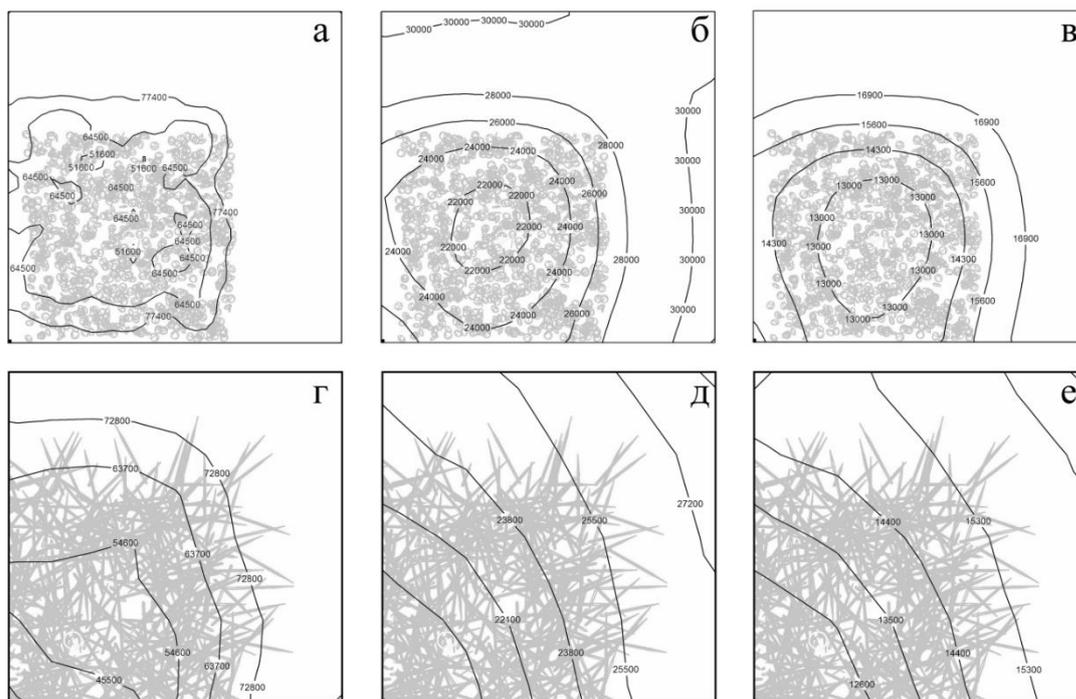


Рис. 3. Результаты оценки горизонтальной освещенности, полученные в ходе моделирования распространения солнечного света в фрагментах растительного покрова на виртуальной тестовой площадке для условий освещения на 01.07, вид в плане (левый столбец – ясное небо, средний – переменная облачность, правый – только рассеянное освещение, а-в – покров, образованный карликовой березой, г-е – покров, образованный осоками)

Заключение

Как показали результаты экспериментов, структура растительного покрова, представленная пространственным положением фитоэлементов, оказывает значительное влияние на распространение солнечного излучения. Обнаруженные различия во взаимодействии излучения с рассмотренными типами покрова рекомендуется учитывать при решении таких задач, как анализ возможности нарушения устойчивости сооружений вследствие изменения термического режима толщ грунтов, определение разности температур грунта и приземного слоя воздуха, оценка фотосинтетической активности растительного покрова. Продолжением работы могут стать, например, исследования, нацеленные на анализ воздействия структуры покрова на пространственную изменчивость параметров грунтовых толщ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-35-00255 мол_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. Аэрокосмические исследования почв и растительности. Гидрометеиздат, 1986. 231 с.
2. Мателенок И.В., Мелентьев В.В. Исследование трехмерной структуры растительного покрова ерниковых тундр с применением фотографической съемки и методов автоматизированной обработки изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 100–111.
3. Миронов В.Л., Музалевский К.В., Ружичка З. Микроволновый радиометрический метод измерения температуры поверхности почвы арктической тундры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 61–71.
4. Росс Ю.К., Нильсон Т. Пропускание прямой радиации солнца сельскохозяйственными посевами // Вопросы радиационного режима растительного покрова. Тарту: изд. Ин-та физики и астрономии АН ЭССР, 1965. С. 25–64.

5. Campbell G.S. Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distribution // *Agricultural and forest meteorology*. 1990. V. 49. No. 3. P. 173–176.
6. Juszak I., Iturrate-Garcia M., Gastellu-Etchegorry J.P., Schaepman M.E., Maximov T.C., SchaepmanStrub G. Drivers of shortwave radiation fluxes in Arctic tundra across scales // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 193. P. 86–102.
7. Matelenok I.V. Melentyev V.V. Three-dimensional structure of tundra vegetation cover dominated by sedges // *Arctic Environmental Research*. 2018. No. 4. P. 132–140.
8. Thomas S. C., Winner W. E. A rotated ellipsoidal angle density function improves estimation of foliage inclination distributions in forest canopies // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000. Vol. 100. No. 1. P. 19–24.
9. Wang W. M., Li Z. L., Su H. B. Comparison of leaf angle distribution functions: effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2007. Vol. 143. No. 1–2. P. 106–122.

Митник Л.М.* , Кулешов В.П., Митник М.Л.

**Внезапные стратосферные потепления в северном и южном
полушариях по микроволновым измерениям со спутников
Метеор-М № 2 и № 2-2**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук
Россия, 690041, Владивосток, Балтийская ул., дом 43
*E-mail: lm_mitnik@mail.ru

По яркостным температурам ($T_{\text{я}}$), измеренным со спутников "Метеор-М" №2 и №2-2 микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ, рассмотрена изменчивость температуры верхней тропосферы и стратосферы при внезапных стратосферных потеплениях (ВСП) в Северном и Южном полушариях. Вариации $T_{\text{я}}$ на 10 каналах МТВЗА-ГЯ в диапазоне частот $\nu \approx 52\text{--}57$ ГГц обусловлены изменчивостью температуры воздуха до высоты $\approx 40\text{--}50$ км. Из результатов ежедневных глобальных наблюдений следует, что температура стратосферы за несколько дней могла возрасти на 50°C и более. Проанализированы временные ряды $T_{\text{я}}(\nu)$ на различных частотах до, во время и после ВСП. Выполнено сравнение $T_{\text{я}}(\nu)$ с вертикальными профилями температуры воздуха по радиозондовым данным в полярных областях. Показано, что спутниковые измерения хорошо согласуются с данными радиозондов и реанализа.

Ключевые слова: внезапные стратосферные потепления; радиометр МТВЗА-ГЯ; "Метеор-М" №2 и №2-2; яркостная температура, потепление над Антарктидой.

Leonid M. Mitnik* , Vladimir P. Kuleshov, Maia L. Mitnik

**Sudden Stratospheric Warmings in the Northern and Southern
Hemispheres from Meteor-M N 2 and N 2-2 microwave measurements**

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences
Russia, 690041, Vladivostok, Baltiyskaya Str., 43
*E-mail: lm_mitnik@mail.ru

The brightness temperatures measured from the Meteor-M satellites # 2 and # 2-2 by the MTVZA-GY microwave radiometer are used to study the temperature variability of the upper troposphere and stratosphere during Sudden Stratospheric Warming (SSW) in the Northern and Southern hemispheres. Variations in brightness temperatures (T_{B}) on ten MTVZA-GY channels in the frequency range $\nu \approx 52\text{--}57$ GHz are caused by air temperature variability up to an altitude of $\approx 40\text{--}50$ km. From the results of daily global observations, it follows that the temperature of the stratosphere in a few days could increase by 50°C or more. Time series of T_{B} at various frequencies before, during, and after SSW are analyzed. The $T_{\text{B}}(\nu)$ is compared with vertical profiles of air temperature based on radiosonde data in polar regions. It is shown that satellite measurements are in good agreement with radiosonde and reanalysis data.

Keywords: sudden stratospheric warming; MTVZA-GY radiometer; Meteor-M # 2 and #2-2 satellites; brightness temperature, warming over Antarctica.

Введение

Внезапное стратосферное потепление (ВСП) представляет собой явление, при котором температура полярной стратосферы за несколько дней возрастает на несколько десятков градусов (вплоть до 50°C) [1]. Явление называется "главным" (major), если на уровне 10 гПа (30–32 км) средний зональный поток в полярных широтах (к северу или к югу от 60° или ниже) меняет направление на противоположное, и "малым" (minor), если направление зонального потока не меняется.

Среднее за зиму количество главных ВСП составляет в Северном полушарии $\approx 0,6$ [1]. В Южном полушарии потепления происходят существенно реже, поскольку воздействие планетарных волн на стратосферу здесь значительно слабее из-за меньших различий в топографии и контрастов суша-море. Единственным главным ВСП в Антарктике было потепление в сентябре 2002 г. [2–5].

Между ВСП и изменениями в атмосфере в обоих полушариях выявлены связи, проявляющиеся в распределениях направления и скорости ветра, температуры воздуха, плотности электронов, скорости химических реакций и других характеристик [3–6]. Механизмы образования потеплений и их воздействие на процессы от поверхности до термосферы изучены недостаточно, особенно в Южном полушарии [2, 5, 6], что определяет актуальность их исследования разными методами, включая спутниковые.

Материалы и методы

Основным источником данных о температуре стратосферы служит уходящее микроволновое (МВ) излучение Земли, принимаемое радиометром МТВЗА-ГЯ. Внезапные стратосферные потепления были обнаружены по измерениям МТВЗА-ГЯ с метеорологического спутника "Метеор-М" №2 в 2015–2016 гг. в Северном полушарии [7], а в сентябре 2019 г. со спутника "Метеор-М" №2-2 — в Южном [8]. Спутник "Метеор-М" №2-2 был запущен на солнечно-синхронную орбиту высотой 830 км 4 июля 2019 г. МТВЗА-ГЯ сканирует Землю по конусу при угле падения $\theta = 65^\circ$. Ширина полосы обзора радиометра составляет на восходящих витках 2500 км, а на нисходящих — 1500 км из-за затенения поля обзора солнечными панелями [8]. Измерения МТВЗА-ГЯ со спутника "Метеор-М" № 2-2 выполняются на 31 канале. Подробные функциональные и технические параметры прибора и схема сканирования рассмотрены в [5–8]. Сведения о геофизических переменных тропосферы и земной поверхности могут быть найдены из яркостных температур $T_y(\nu)$ на вертикальной (в) и горизонтальной (г) поляризациях на частотах имаджера $\nu = 10,6, 18,7, 23,8, 31,5, 36,5, 42,0, 48,0$ и $91,6$ ГГц, а вертикальные профили температуры и влажности тропосферы и стратосферы — из измерений на частотах зондировщика в областях сильного поглощения кислорода $\nu = 52,8–57,6$ ГГц и водяного пара $\nu = 176–190$ ГГц [8, 9, 11].

Для восстановления вертикального распределения температуры тропосферы и стратосферы используются измерения на 10 каналах зондировщика в диапазоне частот $\nu = 52,8–57,3$ ГГц, обозначенных О1–О10. Пространственное разрешение каналов составляет 21×48 км, а размер приведенного пикселя изображения равен 48×48 км.

Поглощение в атмосфере, равное сумме поглощений в кислороде, водяном паре, озоне и в других газах, облаках и осадках может быть найдено по формуле:

$$\tau(\nu) = \int \gamma(\nu, h) dh,$$

где $\gamma(\nu, h)$ — погонное поглощение в атмосфере, зависящее от температуры, давления и влажности воздуха и газового состава атмосферы, h — высота. На частотах каналов О1–О10 поглощение в атмосфере на луче зрения $\tau(\nu) \sec \theta > 4–5$ Нп, и яркостная температура уходящего излучения Земли может быть записана в виде:

$$T_y(\nu, \theta) = \int_0^H T(h) K(\nu, h, \theta) dh, \quad (2)$$

где

$$K(\nu, h, \theta) = \gamma(\nu, h, \theta) e^{-\int_h^\infty \gamma(\nu, h') \sec \theta dh'} \quad \sec \theta \text{ — весовая функция} \quad (3)$$

На рис. 1 приведены графики весовых функций (ВФ) на каналах О1–О10 при $\theta = 65^\circ$, рассчитанные по профилям температуры $T(h)$ и давления $P(h)$ атмосферы в июне–июле–августе в широтной зоне 70° ю. ш. [12].

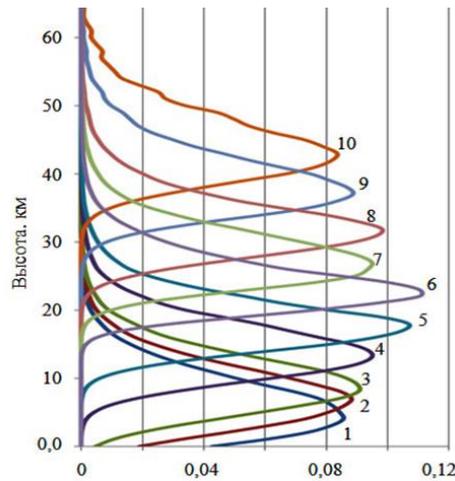


Рис. 1. Весовые функции каналов O1–O10 в диапазоне 52,8–57,6 ГГц при угле падения 65°, найденные для широтной зоны 70° с. ш. Цифры 1–10 — номера каналов

Полуширина ВФ составляет примерно 10–12 км, а максимумы ВФ смещаются по высоте от ≈ 10 до ≈ 47 км. В результате излучение, принимаемое на каналах O1–O10, характеризует взвешенную температуру различных слоев атмосферы.

Результаты

Для анализа процессов в стратосфере были построены ежедневные поля $T_y(v)$ на каналах O4–O10 с 6 августа по 30 сентября 2019 г. На рис. 2 приведены поля $T_y(v)$ за отдельные даты. 24 августа T_y на каналах O5–O7 составляла 170–200 К. Основной вклад в T_y на этих каналах дает слой атмосферы от ≈ 17 до ≈ 25 –27 км (рис. 1). На каналах O8–O10, $T_y \approx 210$ –260 К и росла с номером канала. Одновременно увеличивалась и площадь районов с более высокой температурой. Над Южным полюсом $T_y \approx 190$ –230 К, что ниже, чем в кольцевой области вокруг него (≈ 200 –250 К).

30 августа температура увеличилась на всех каналах, но особенно на O8–O10, где приращения составили 30 К на O8, 50 К на O9 и 40 К на O10. Над Южным полюсом $T_y \approx 270$ К (канал O10). Область минимальных температур располагалась на запад и север от центра. На каналах O5 и O6 T_y росла на восток от центра в полосе между ≈ 50 и 70° ю. ш., а над полюсом, попрежнему отмечалась низкая температура (≈ 180 –190 К).

4, 6 и 7 сентября высокие значения температуры на каналах O8–O10 (≈ 240 –270 К) отмечалась над обширной областью, в том числе и над Южным полюсом. На каналах O5–O7 значения T_y , зависящие от температура верхней тропосферы – нижней стратосферы выросли до 210–220 К. Холодный воздух отмечался преимущественно в западном секторе антарктической области. Температура здесь составляла ≈ 190 –210 К.

ВСП над северным полушарием наблюдались со спутника "Метеор-М" №2. По данным МТВЗА-ГЯ в январе 2015 г. было зарегистрировано "малое", а в марте 2016 г. – "главное" потепление [7, 9]. На рис. 3 показаны поля T_y на каналах O5 и O8–10 по измерениям МТВЗА-ГЯ 5 января 2015 г., когда наблюдалось максимальное потепление.

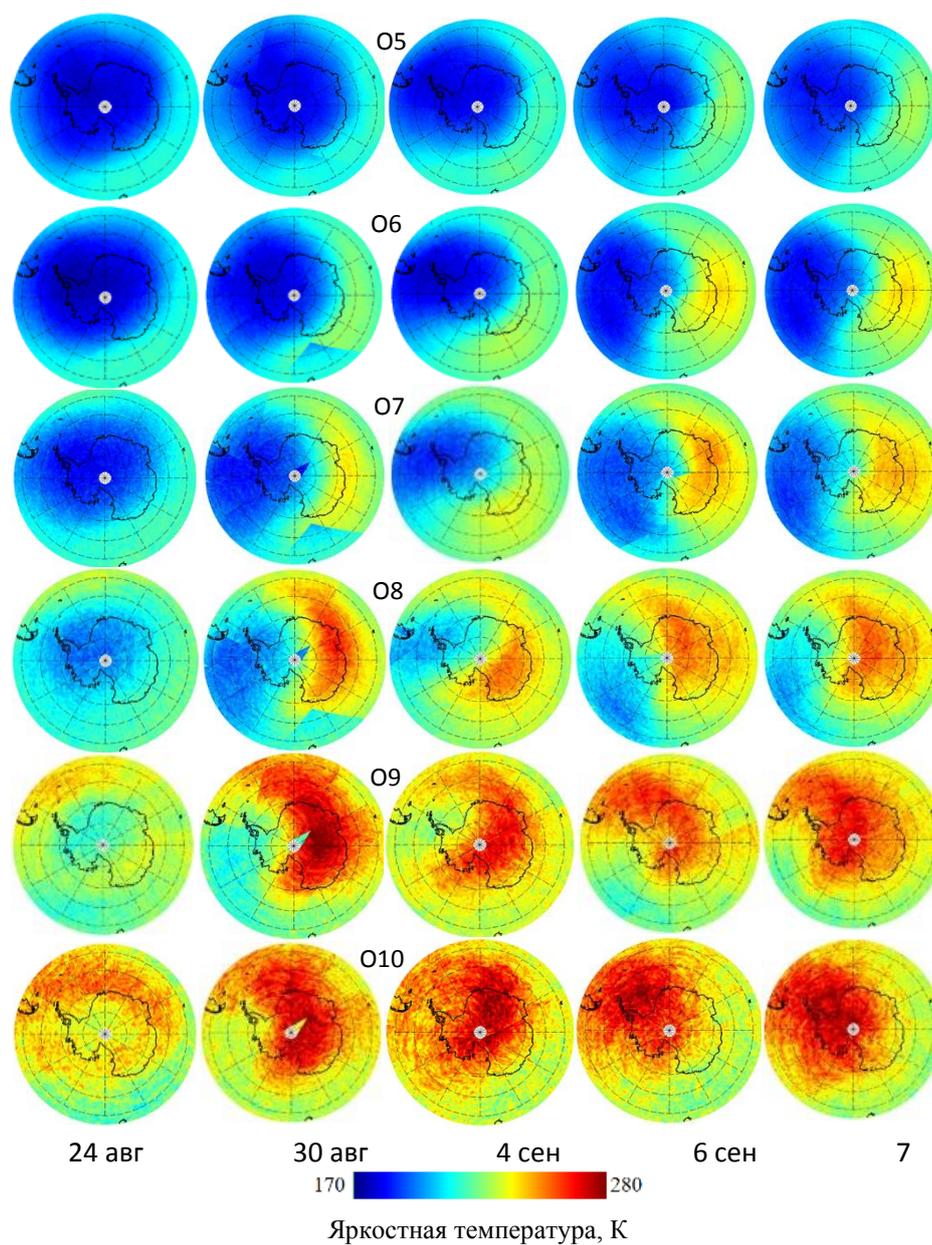


Рис. 2. Изменчивость яркостной температуры над Южной полярной областью по измерениям радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника "Метеор-М" № 2-2 до и во время внезапного стратосферного потепления в конце августа – начале сентября 2019 года

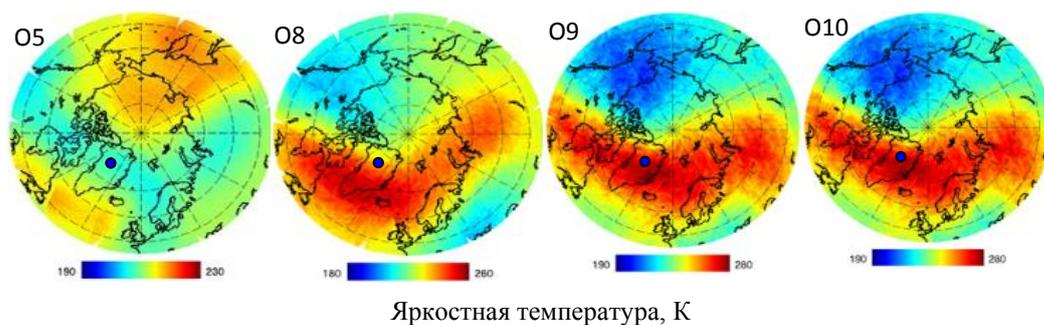


Рис. 3. Яркость температура стратосферы на каналах O5, O8, O9 и O10 над северной полярной областью 5 января 2015 г. Синий кружок – станция Summit

На рис. 4 приведены временные ряды T_y на канале O8 и температура воздуха у поверхности на станции Summit (72,57 ° с. ш., 38,45 ° з. д.) (Гренландия). Красные точки на рис. 4 – значения T_y на восходящих орбитах, а синие — на нисходящих (левая шкала); температура воздуха у поверхности показана крестиками (правая шкала).

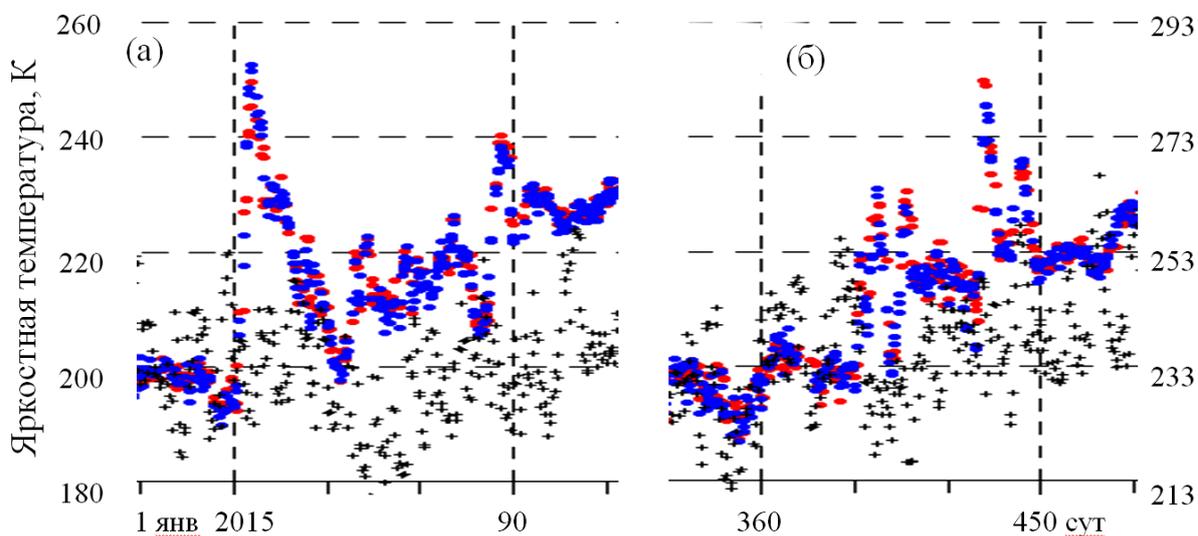


Рис. 4. Временной ряд яркостной температуры на канале O8 над станцией Summit (Гренландия) в периоды малого (а) и главного (б) потеплений

Заключение

Количественная информация об изменчивости температуры стратосферы, о связях процессов в стратосфере и тропосфере при возникновении и развитии внезапного стратосферного потепления может быть получена из измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ на спутниках серии "Метеор-М". Для изучения сложных взаимодействий в системе поверхность – атмосфера необходимо сочетание спутниковых и наземных наблюдений, данных моделирования и реанализов. Роль спутникового МВ зондирования при изучении взаимодействия различных сфер возрастёт после запуска в 2021–2022 гг. двух новых спутников серии "Метеор-М".

ЛИТЕРАТУРА

1. Butler A.H., Sjoberg J.P., Seidel D.J., Rosenlof K.H. A sudden stratospheric warming compendium // Earth System Science Data. 2017. V. 9. No. 1. P. 63–76.
2. Baldwin M.P., Ayarzagueno B., Birner T., et al. Sudden stratospheric warmings // Earth and Space Science Open Archive, doi:10.1002/essoar.10502884.1, 2020.
3. Lim E., Hendon H.H., Boschhat G. et al. Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex // Nature Geoscience. 2019. V. 12. P. 896–901, <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0456-x>

4. Varotsos C., Kondratyev K.Ya. The unusual split in the Antarctic ozone hole in September 2002 // Исследование Земли из космоса. 2003. № 1. С. 92–93.
5. Yamazaki Y., Matthias V., Miyoshi Y. et al. September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming: Quasi-6-day wave burst and ionospheric effects // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47, e2019GL086577. <https://doi.org/10.1029/2019GL086577>.
6. Pedatella N.M., Chau J.L., Schmidt H., et al. Siddiqui. How Sudden Stratospheric Warmings affect the whole atmosphere // Eos. 2018. V. 99, P. 35–38, <https://doi.org/10.1029/2018EO092441>.
7. Mitnik L.M., Kuleshov V.P., Pichugin M.K., Mitnik M.L. Sudden stratospheric warming in 2015–2016: Study with satellite passive microwave data and reanalysis // Proceedings of IGARSS 2018. Valencia. 23-27 July, P. 5560–5563.
8. Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Стрельцов А.М., Евсеев Г.Е., Черный И.В. Моделирование яркостных температур и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 51–65.
9. Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Черный И.В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника Метеор-М № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса // 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100.
10. Cherny I.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L., Uspensky A.B., Streltsov A.M. On-orbit calibration of the “Meteor-M” Microwave Imager/Sounder // Proc. IGARSS 2010. P.558–561.
11. Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Streltsov A.M., Cherniavsky G., Cherny I. Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: modeling, calibration and measurements // IEEE Journal of Selected Topics Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. N. 7. P. 3036–3045.
12. ГОСТ Р 53460-2009. Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики.

Поздняков Д.В.* , Чепикова С.С.

**Феномен массовых цветений *E. huxleyi* в Мировом океане:
многолетние спутниковые исследования в субарктических
и арктических морях**

Научный фонд «МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЦЕНТР ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ
И ДИСТАНЦИОННОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ имени НАНСЕНА» (Фонд «Нансен-центр»)
Россия, 199034, Санкт-Петербург, 14-я Линия В.О., дом 7,
Бизнес-центр «Преображенский», офис 49
*E-mail: dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru

Возникшая еще в далекие геологические эпохи, *Emiliana huxleyi* (класс Prymneosiophyceae) за последние 100 тысяч лет приобрела статус доминантного рода кокколитофоров благодаря своей замечательной способности приспособления к изменяющимся условиям окружающей среды и способности конкурировать с другими видами фитопланктона. Образуя огромные по площади области массового цветения по всему Мировому океану и при этом продуцируя в больших объемах неорганический углерод в виде кальцита, эта микроводоросль играет важную роль в формировании карбонатной системы морской среды и в воздействии на величину и направление потоков CO₂ в системе атмосфера-океан. В свете новых данных, в статье исследуются вопросы взаимодействия между массовыми цветениями этого таксона и окружающей средой в условиях происходящих климатических сдвигов. Особое внимание уделено обсуждению новых количественных оценок характеристик данного феномена, полученных в последние 20 лет, и появившимся прогностическим оценкам его динамики на среднесрочную перспективу.

Ключевые слова: кокколитофоры; *Emiliana huxleyi*; массовые цветения в Мировом океане; морская карбонатная система; CO₂; воздействие на атмосферу и экологию.

Dmitry V. Pozdnyakov* , Svetlana S. Chepikova

**Phenomenon of *E. huxleyi* massive outbreaks in the world's oceans:
multidecadal spaceborne studies in subarctic and Arctic seas**

Scientific Foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre”
(Nansen Centre, NIERSC)
Russia, 199034, Saint-Petersburg, 14th Line 7, Office 49, Vasilievsky Island
*E-mail: dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru

Evolved from the genus *Gephycapsa* (class Prymneosiophyceae), *Emiliana huxleyi* has acquired over the past 100 thousand years a status of ecologically most predominant coccolithophore due its remarkable adaptability to a variety of environmental conditions and interspecific competitiveness. Due to its ability to produce organic and inorganic carbon as well to form remarkably massive blooms around the world's oceans, *E. huxleyi* plays an important role in both marine carbon system, and carbon cycling between the atmosphere and ocean. The present paper examines both older information and recent findings elucidating the current tendencies in the two-way interactions between *E. huxleyi* assemblages and the immediate and global environment under conditions of climate change. A special attention is given to the quantitative data reported over the last two decades on such interactions, and only very lately appeared mid-term projections of *E. huxleyi* bloom dynamics across the world's oceans.

Keywords: coccolithophores; *Emiliana huxleyi*; massive blooms in world's oceans; marine carbonate chemistry; CO₂; atmospheric and ecological impacts.

Важная климатологическая роль мирового океана состоит в сокращении накопления в атмосфере одного из основных парниковых газов, CO₂ за счет его поглощения. Это оказывается возможным, поскольку парциальное давление растворенного CO₂ в морских поверхностных водах меньше, чем содержание CO₂ в атмосфере. Однако есть живые морские организмы, которые способны, по крайней мере в пределах своей среды обитания, ослабить или даже полностью подавить этот механизм. Среди этой

группы морских организмов ведущая роль принадлежит кокколитофорам. Среди морских биосистем кокколитофоры (класс *Primnesiophyceae*) являются наиболее продуктивными кальцифицирующими водорослями [1]. Они производят неорганический углерод в виде частиц (в форме кальцита) и способствуют повышению парциального давления CO_2 ($p\text{CO}_2$) в окружающих морских поверхностных водах. Таким образом, биологическая активность кокколитофоров может оказывать прямое влияние как на интенсивность (и даже направления) потоков CO_2 на границе атмосферы и океана, так и на карбонатную систему морской среды (КСМС).

Под действием т.н. органического насоса поток CO_2 оказывается направленным из атмосферы в поверхностные слои океана. Это происходит в процессе осаждения частиц органического углерода водорослевого происхождения: по мере движения в глубь океана органический CO_2 высвобождается в окружающую морскую среду в ходе процесса реминерализации и далее накапливается в глубинах океана (рис. 1). Наряду с этим, по механизму обратного карбонатного насоса, CaCO_3 (в виде кокколитов) экспортируется вниз и на глубине растворяется. При этом высвобождается CO_2 , что в конечном счете приводит к росту парциального давления этого вещества в поверхностных водах океана. В результате, результирующий поток CO_2 может поменять направление, т.е. перенаправиться из океана в атмосферу [2] (рис. 1А). Так называемое «rain ratio», т.е. отношение массы неорганического углерода к органическому углероду, определяет интенсивность и направление потока CO_2 на границе атмосферы и океана. В случае кокколитофоров «rain ratio» превышает единицу в пределах их ареала обитания, что потенциально может иметь климатические последствия, а также вызывать изменения в карбонатной системе морской среды [3].

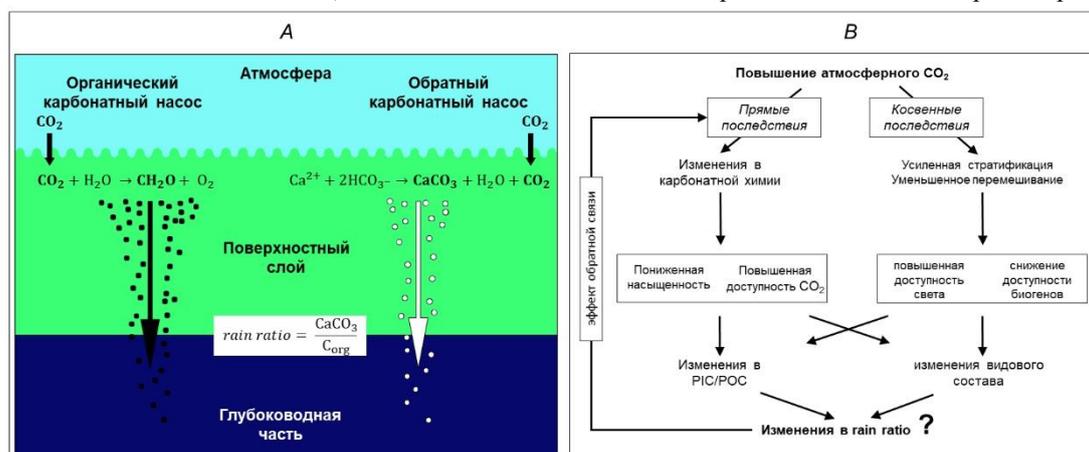


Рис. 1. А: Биологические насосы, приводящие к (i) поглощению CO_2 из атмосферы и (ii) переносу карбоната кальция с поверхности в глубину океана; В: ожидаемые будущие и обратные изменения в экологии океана, вызванные увеличением атмосферного CO_2 . PIC – неорганический углерод в виде частиц; POC – органический углерод в виде твердых частиц [4]

Emiliana huxleyi является наиболее распространенным видом кокколитофоров в Мировом океане, что, в свете вышесказанного, естественным образом объясняет, почему это одна из наиболее изученных морских водорослей. Из всех других кокколитофоров, микроводоросль *E. huxleyi*, вероятно, наиболее эффективна в формировании обширных цветений в морских водах во всем мире, от олиготрофных до эвтрофных. В отличие от диатомовых водорослей и динофлагеллят, эта водоросль поразительно устойчива к вариациям света и может успешно развиваться как в условиях низких уровней световых потоков, так и в условиях очень высокой интенсивности света. Поскольку высокие уровни падающего света/излучения усиливают кальцификацию (которая является преимущественно светозависимой реакцией), предполагается, что механизм кальцификации позволяет клеткам *E. huxleyi* противостоять фотоповреждениям за счет рассеивания избыточной лучистой энергии. Эта особенность важна в случае вод с низким содержанием питательных веществ, особенно в сочетании с высоким уровнем *E. huxleyi* к питательным веществам, включая азот, и особенно фосфор. Способность к миксотрофному питанию и устойчивость, по крайней мере частичная, к выеданию зоопланктоном и к вирусным атакам (из-за покрытия клеток кокколитами/чешуйками из кальцита) обуславливает способность этой водоросли выдерживать различные неблагоприятные внешние условия и устойчиво удерживать свою экологическую нишу [5]. Эти биологические возможности наделяют *E. huxleyi* довольно редким свойством стремиться к стратегии максимального роста при минимизации потерь. Эта способность проявляется в обширности и

устойчивости локализации районов цветения *E. huxleyi*. Типичная площадь цветения (S) составляет не менее тысяч квадратных километров, а во многих морских акваториях она намного больше [6]. Например, в отдельные годы значение S в Северном и Норвежском море может существенно превышать $100 \cdot 10^3 \text{ км}^2$, в Беринговом море максимальные значения S были зарегистрированы на уровне $250 \cdot 10^3 \text{ км}^2$, особенно большие площади цветения *E. huxleyi* (до $380 \cdot 10^3 \text{ км}^2$) наблюдались в Баренцевом море [7]. В субполярной и полярной зонах Северного полушария, в водах вокруг Великобритании, в Северном, Норвежском, Лабрадорском, Гренландском, Баренцевом и Беринговом морях цветения *E. huxleyi* происходят ежегодно, хотя и разной интенсивностью [8]. Продолжительность цветения в Северной Атлантике и Баренцевом море в среднем составляет около трех-четырех недель. Для морей, расположенных на умеренных, субполярных и полярных широтах северного полушария момент начала максимума площади цветения *E. huxleyi* смещается, соответственно, с июня-июля на сентябрь-октябрь. Эта последовательность имитирует схему потока Golf Stream. В Беринговом море временная картина вариаций S выявляет два периода (1998–2001 гг. и 2018–2020 гг.) чрезвычайно интенсивных вспышек *E. huxleyi*. Предполагается, что это явление было вызвано массивной адвекцией обедненных железом вод северной части Тихого океана из-за значительного ослабления Аляскинского течения. Предполагается, что последнее является удаленным следствием («teleconnection») исключительно сильных явлений Эль-Ниньо в 1996–1997 и 2017 годах, соответственно [9].

Спутниковые исследования 1998–2018 гг. показали, что вспышки *E. huxleyi* привели к выбросу неорганического углерода (PIC) в виде CaCO_3 в поверхностные воды в количествах от ~ 10 до нескольких сотен кило тонн. В Баренцевом море количество освобожденного PIC варьировало от ~ 100 кт до 250–300 кт, тогда как в Беринговом море в течение двух периодов исключительной активности содержание PIC достигало 500 кт [7].

Имеется достаточно свидетельств того, что выброс PIC сопровождался значительным увеличением парциального давления CO_2 ($\Delta p\text{CO}_2$) в зоне цветения: между 1998 и 2016 годами среднее и максимальное значения отношения $p\text{CO}_2/(\Delta p\text{CO}_2)_{\text{фоновое}}$ варьировались в диапазоне $\sim (20\text{--}40)\%$ и $\sim (30\text{--}60)\%$. Наибольшая численность отмечена в Беринговом и Баренцевом морях [10, 11].

Кроме того, существуют спутниковые свидетельства повышения атмосферного ΔCO_2 в столбе над цветением *E. huxleyi*: многочисленные исследования в вышеупомянутых морях Северной Атлантики, а также в Баренцевом и Черном морях доказали, что $(\text{CO}_2)_{\text{атм.}}$ достигают 2–3 ppm [11, 12].

Несмотря на отличительную способность *E. huxleyi* развиваться в условиях, неблагоприятных для водорослей других функциональных групп (например, диатомовых, флагеллят, цианобактерий), очень неравномерная структура зарегистрированных на протяжении более двух десятилетий (с 1998 г. по настоящее время) временных рядов S , PIC и $\Delta p\text{CO}_2$ указывают, тем не менее, на восприимчивость интенсивности цветений этих водорослей к условиям окружающей среды [13, 14, 15]. Статистическая приоритезация абиогенных влияющих факторов среды (ВФ) показывает, что она зависит от моря и периода времени [16]. Таким образом, в Баренцевом море температура поверхности моря (ТПМ) является самым приоритетным ВФ, за которым следует ФАР (фотосинтетическая активная радиация). В Беринговом море, помимо вышеупомянутых периодов (с 1998 по 2001 год и с 2018 года по настоящее время), соленость поверхности моря (СПМ) является лидером среди ВФ, ФАР занимает второе место, тогда как ТПМ занимает лишь третье место в этом ряду. Хотя эти оценки были выполнены без явного учета концентраций биогенных веществ (БВ), косвенно они входили в число ВФ. Действительно, можно утверждать, что вариации ТПМ, СПМ, концентрации Хл-а, глубины перемешанного слоя (MLD) и скорости/адвекции вод поверхностными течениями (протестированных как ВФ) косвенно объясняют вариации БВ, а также такие параметры карбонатной химии океана, как щелочность и основность ([16, 17] и ссылки в них).

В долгосрочной перспективе, в условиях устойчивого накопления CO_2 в атмосфере, этот фактор следует адекватно учитывать [18]. Ожидается, что воздействие роста содержания CO_2 в атмосфере на окружающую среду будет происходить через ряд прямых и косвенных взаимодействий (рис. 1В), каждое из которых в конечном итоге должно вызвать изменения в «rain ratio». В частности, увеличение содержания CO_2 в атмосфере приводит к повышению глобальной температуры, а в дальнейшем к усилению стратификации, усилению освещенности внутри эвфотической зоны, сокращению потоков биогенов из нижних слоев океана. Хотя усиление потоков CO_2 в верхние слои океана вызывает снижение уровня pH и содержания CO_3^{2-} в воде, тем не менее большой естественный запас HCO_3^- в морской воде, по-прежнему, поддерживает механизмы кальцификации. Таким образом, это приведет к установлению условий окружающей среды, неблагоприятных для некальцифицирующего фитопланктона (НКФП), но

благоприятных (или, по крайней мере, по-прежнему, приемлемых) для развития кокколитофоров в целом и для *E. huxleyi* в первую очередь. Уменьшение NCP и практически бесконкурентный рост *E. huxleyi* приведет к дальнейшему снижению потребления растворенного CO₂ другими группами фитопланктона, увеличению pCO₂ в поверхностных водах океана и усилению потоков CO₂ в атмосферу. Одновременно с этим, через систему обратных взаимодействий, изменения в «rain ratio» неизбежно влияют на потоки углерода на границе раздела вода-атмосфера. Таким образом, сценарий дальнейшего увеличения содержания CO₂ в атмосфере в будущем, по всей вероятности, предполагает более широкое распространение *E. huxleyi* в Мировом океане.

Применение имеющихся климатических моделей IPCC в сочетании со статистико-математическими моделями цветения *E. huxleyi* [16] позволяют делать среднесрочные прогнозы предстоящих изменений [19]. Однако наших знаний о взаимном влиянии изменения климата, а также о структуре и функционировании морских экосистем (даже на уровне первичных продуцентов!) все еще недостаточно, чтобы с уверенностью прогнозировать будущую динамику явления *E. huxleyi*. Требуются дополнительные исследования даже на уровне исчерпывающего понимания механизма внутриклеточной свето-зависимой реакции кальцификации, ее изменчивости в функции химического состава карбонатов морской воды и ВФ [20]. Создание соответствующих многолетних баз данных (как это сделано, например, в [14]), а также дальнейшее их пополнение спутниковыми, судовыми и лабораторными данными по данной проблематике необходимы для получения действительно достоверной оценки климатологической и экологической роли цветения *E. huxleyi* в региональном и глобальном масштабах.

Выражаем благодарность Российскому научному фонду (РНФ) за финансовую поддержку работы (проект № 17-17-01117).

ЛИТЕРАТУРА

1. Taylor A.R., Brownlee C., Wheeler. G. Coccolithophore cell biology: chalking up progress // Annual Review of Marine Sciences. 2017. № 9. P. 283–310. doi:10.1146/annurev-marine-122414-034032
2. Balch W.M., Bates N.R., Lam P.J., Twining. B.S., Rosengard S.Z., Bowler. B.C., Rauschenberg S. Factors regulating the Great Calcite Belt in the Southern Ocean, and its biogeochemical significance // Global Biogeochemical Cycles. 2016. 30(8), 1124–1144. doi:10.1002/2016GB005414
3. Balch W.M. The ecology, biogeochemistry, and optical properties of coccolithophores // Annual Review of Marine Sciences. (2018) 109, 71–98. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063319>
4. Rost B. Riebesell U. Coccolithophores and the biological pump: responses to environmental changes. In: Coccolithophores, from molecular processes to global impact (Eds. Thierstein H.R., Young J.R.). Heidelberg, Germany: Springer. 2004. P. 99–125.
5. Godrijan J., Drapeau D., Balch W.M. Mixotrophic uptake of organic compounds by coccolithophores // Limnology and Oceanography. 2020. № 65. P. 1410–1421. doi:10.1002/lno.11396
6. Kondrik D.V., Pozdnyakov D.V., Pettersson L.H. Tendencies in Coccolithophorid Blooms in Some Marine Environments of the Northern Hemisphere according to the Data of Satellite Observations in 1998–2013 // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. № 53. P. 955–964. doi: 10.1134/S000143381709016X
7. Kondrik D., Pozdnyakov D., Pettersson L. Particulate inorganic carbon production within *E. huxleyi* blooms in subpolar and polar seas: a satellite time series study (1998–2013) // International Journal of Remote Sensing. 2017. № 38:22. P. 6179–6205. doi:10.1080/01431161.2017.1350304
8. Pozdnyakov D.V., Pettersson L.H., Korosov A.A. Exploring the Marine Ecology from Space. Springer International Publishing: Switzerland. 2017, 215 p.
9. Pozdnyakov D., Kondrik D., Chepikova S. Origination of *E. huxleyi* extraordinary bloom outbursts in the Bering Sea between the late 1990s and early 2000s, and in 2018–2019: A hypothesis // Fisheries Oceanography (submitted). 2020.
10. Kondrik D.V., Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M. Satellite evidence that *E. huxleyi* phytoplankton blooms weaken marine carbon sinks // Geophysical Research Letters. 2018. № 5. P. 846–854. doi: 10.1002/2017GL076240
11. Kondrik D.V., Kazakov E.E., Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M. Satellite evidence for enhancement of the column mixing ratio of atmospheric CO₂ over *E. huxleyi* blooms // Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Limnologia i Oceanologia series. 2019. № 9. P. 1–11. doi: 10/17076/lim1107

12. Morozov E.A., Kondrik D.V., Chepikova S.S., Pozdnyakov D.V. Atmospheric columnar CO₂ enhancement over *E. huxleyi* blooms: case studies in the North Atlantic and Arctic waters // Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Limnologia i Oceanologia series. 2019. № 3. P. 1-6. doi:10.17076/lim989
13. Nissen C., Munnich M., Grube M., Haumann N. Factors controlling coccolithophore biogeography in the Southern Ocean // Biogeosciences. 2018. № 15(22) P. 6997-7024. doi:10.5194/bg-15-6997-2018
14. Kazakov E., Kondrik D., Pozdnyakov D. A synthetic satellite dataset of the spatio-temporal distributions of *Emiliana huxleyi* blooms and their impacts on Arctic and sub-Arctic marine environments (1998–2016) // Earth Systems Science Data. 2019. № 11. P. 119–128. doi: 10.5194/essd-11-119-2019
15. Silkin V., Pautova L., Giordano M., Chasovnikov V., Vostokov S., Podymov O., Parkhomova S., Moskalenko L. Drivers of phytoplankton blooms in the northeastern Black Sea // Marine Pollution Bulletin. 2019. № 138. P. 274–284. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.11.042
16. Pozdnyakov D.V., Kondrik D.V., Kazakov E.E., Chepikova S. Environmental conditions favoring coccolithophore blooms in subarctic and arctic seas: a 20-year satellite and multi-dimensional statistical study // Proceedings of the SPIE 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2019. 111501W (14 October 2019). doi: 10.1117/12.2547868
17. Durairaj P., Sarangi R., Ramalingam S., Thirunavukarassu T., Chauhan P. Seasonal nitrate algorithms for nitrate retrieval using OCEANSAT-2 and MODIS-AQUA satellite data // Environmental Monitoring Assessment Journal. 2015. № 187. P. 176-189. doi:10.1007/s10661-015-4340
18. Rivero-Calle S., Gnanadesikan A., Del Castillo C., Balch W., Guikema S. Multidecadal increase in North Atlantic coccolithophores and the potential role of rising CO₂ // Science. 2015. № 350 (6267). P. 1533–1537. doi: 10.1126/science.aaa8026
19. Gnatiuk N., Radchenko I., Davy R., Morozov E., Bobylev L. Simulation of factors affecting *Emiliana huxleyi* blooms in Arctic and sub-Arctic seas by CMIP5 climate models: model validation and selection // Biogeosciences. 2020. № 17. P. 1199–1212. doi:10.5194/bg-17-1199-2020
20. Vihma T., Uotila P., Sandven S., Pozdnyakov D., Makshtas A., Pelyasov A., Pirazzini R., Danielsen F., Chalov S., Lappalainen H.K., Ivanov V. Towards an advanced observation system for the marine Arctic in the framework of the Pan-Eurasian Experiment (PEEX) // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. № 19. P. 1941–1970. doi: 10.5194/acp-19-1941-2019

**Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Лупян Е.А.* ,
Радченко М.В., Сычугов И.Г.**

ЦКП «ИКИ-Мониторинг», текущие возможности и направления развития

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований
Российской академии наук,
Россия, 117997 Москва, Профсоюзная, 84/32
*E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

Работа посвящена рассмотрению вопросов, связанных с работой и развитием центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных Института космических исследований Российской академии наук (ЦКП «ИКИ-Мониторинг», <http://ckp.geosmis.ru/>). В ней обсуждаются основные задачи центра и приводится базовая информация о его текущих возможностях. В том числе, представлена информация о составе и работе распределенной системы архивации данных, которая по состоянию на август 2020 обеспечивала пользователям ЦКП возможность непосредственного (online) доступа к почти 4 петабайтам различных спутниковых данных и результатам их обработки. Также описаны основные задачи и возможности уникальной научной установки ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru/>), входящей в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг», и специализированных информационных систем, использующих предоставляемые центром сервисы доступа к данным. Представлена информация о ключевых технологиях, созданных в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) для разработки информационных систем дистанционного мониторинга, которые стали основой для разработки и поддержке ЦКП «ИКИ-Мониторинг». В работе также обсуждаются вопросы, связанные с организацией поддержки и развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Рассматриваются основные проблемы дальнейшего развития центра и предложена перспективная распределенная модель организации ЦКП «ИКИ-Мониторинг», которая сможет в перспективе обеспечить развитие центра с использованием технических и интеллектуальных возможностей различных научных и учебных организаций, ведущих работу в области развития новых методов дистанционных наблюдений Земли для решения научных, образовательных и прикладных задач.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковые данные, информационная система, система коллективного пользования, сверхбольшие массивы данных, спутниковые наблюдения.

**Andrey A. Proshin, Mikhail A. Burtsev, Ivan V. Balashov,
Evgeniy A. Loupian*, Maksim V. Radchenko, Ilya G. Sychugov**

СКР "IKI-Monitoring", current opportunities and directions of development

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
84/32, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia
*E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

The paper considers various problems of operation and development of the IKI RAN shared use center (SUC) for satellite data archiving, processing and analysis (SUC "IKI-Monitoring", <http://ckp.geosmis.ru/>). It provides a brief description of the SUC main goals and tasks along with its present capabilities, including the distributed data archiving system providing online access to nearly 4 petabytes of satellite data and derived products. The paper also describes main goals and capabilities of the VEGA-Science satellite service, a unique scientific unit integrated into the SUC, and various dedicated information systems using data services provided by the SUC. Next, information about the key advanced technologies developed by IKI and used as a basis for the SUC development is given. The final part of the article considers further support and development of the Center. Crucial problems of the SUC support and evolution are highlighted and an advanced distributed structural model of the SUC involving

deployment of dedicated SUC nodes in major research and educational centers in the Earth remote sensing field to improve its operation to a new orbit is proposed.

Keywords: remote sensing, satellite data, information system, shared use system, very large data, satellite observations.

Введение

В настоящее время спутниковые данные дистанционного зондирования Земли используются для решения широкого спектра различных научных и прикладных задач, связанных с мониторингом природных ресурсов и антропогенных воздействий. При этом в течение последних десятилетий наблюдается резкий рост числа функционирующих на орбите космических аппаратов ДЗЗ, принципиально повысилось качество получаемых ими данных, а их объемы растут фактически экспоненциально [1, 2, 3]. Развитие информационных технологий позволило создать и внедрить принципиально новые подходы и технологии к организации работы со спутниковой информацией, обеспечивающие эффективное коллективное использование дорогостоящих вычислительных ресурсов центров сбора, обработки и предоставления данных дистанционного зондирования. Это позволили не только расширить возможности доступа пользователей к спутниковым данным, но и предоставить им разнообразные инструменты для их обработки и анализа с использованием распределенных вычислительных ресурсов. Именно на базе таких технологий и подходов в 2012 году был создан Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений ИКИ РАН - ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) [4, 5]. Основной задачей центра является обеспечение распределенной работы со сверхбольшими архивами спутниковых данных в интересах различных научных и прикладных проектов.

На текущий момент ЦКП «ИКИ-Мониторинг» предоставляет широкий спектр возможностей по работе с многолетними рядами самых разных спутниковых данных, получаемых с российских и международных спутниковых систем. Суммарный объем доступных пользователям в непосредственном доступе (online) данных по состоянию на начало августа 2020 года уже приближается к 4 петабайтам. Общее число научных и образовательных организаций, которые используют возможности центра в настоящее время приближается к ста. Возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг» также используют несколько десятков специализированных информационных систем как научного, так и прикладного назначения. Достаточно детально структура, возможности и опыт эксплуатации центра представлены, в частности, в работах [4, 5]. ИКИ РАН постоянно ведет работы по совершенствованию как программно-аппаратной инфраструктуры центра, так и предоставляемых пользователям сервисов для работы с данными, при этом следует отметить, что фактически взрывной рост возможностей и объемов современной спутниковой информации постоянно требует поиска новых подходов и решений к организации структуры и схемы функционирования центра.

Настоящая работа содержит краткие сведения о текущих возможностях и реализации ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Приводятся общие сведения о работе распределенной системы архивации данных, возможностях уникальной научной установки ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru/>) и специализированных информационных системах, использующих предоставляемые центром сервисы доступа к данным. Представлены ключевые технологии, разработанные в ИКИ РАН и используемые при создании рассматриваемого центра коллективного пользования. В работе также обсуждаются вопросы поддержки и развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Рассматриваются основные проблемы развития центра. Предложена перспективная распределенная модель организации ЦКП «ИКИ-Мониторинг», которая сможет в перспективе обеспечить развитие центра с использованием технических и интеллектуальных возможностей различных научных и учебных организаций ведущих работу в области развития новых методов дистанционных наблюдений Земли для решения научных, образовательных и прикладных задач.

Краткие сведения о текущих возможностях и реализации ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

В настоящее время архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» содержат данные более чем 40 различных приборов наблюдений, получаемых с более чем 60 различных российских и зарубежных спутников. При этом суммарный объем спутниковых данных в архивах по состоянию на начало августа 2020 года уже превышает 3.5 петабайта, а ежедневно в архивы поступает около 3 терабайт новых данных. Благодаря соглашению о сотрудничестве пользователям центра также доступны архивы единой системы работы со спутниковыми данными ФГБУ «НИЦ «Планета» [6]. Зона покрытия данными на текущий момент составляет около 30% площади поверхности Земли. Существенно, что в архивах центра в настоящее время накоплены достаточно длинные ряды данных. Например, архивы данных спутников серии Landsat

начинаются с марта 1984 года. Актуальная информация о наличии данных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» а также в архивах объединенной системы работы с данными ФГБУ «НИЦ «Планета» доступна на информационном сервере центра в разделе «Архивы данных» (<http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6>). Следует иметь в виду, что в этом разделе приводится информация об объемах физически хранящихся в архивах данных, большую часть из которых составляют исходные спутниковые данные, используемые для динамического формирования широкого спектра различных «виртуальных» информационных продуктов [7].

Доступ к спутниковым данным и инструментам для их обработки и анализа реализован на основе спутникового сервиса «ВЕГА-Science» (<http://sci-vega.ru>) [8, 9]. Сервис обеспечивает доступ к многолетним ежедневно пополняющимся архивам спутниковых данных и получаемым на их основе информационным продуктам и, в первую очередь, ориентирован на изучение и анализ растительного покрова. Он предоставляет пользователям широкий спектр различных инструментов для анализа и обработки изображений непосредственно в рамках использования web-интерфейса. Пользователям также предоставляется доступ к разнообразным отчетным формам, графикам и гистограммам, содержащим информацию, полученную на основе анализа и обработки спутниковых данных, а также необходимых данных из других источников.

На основе возможностей, предоставляемых центром коллективного пользования ЦКП «ИКИ-Мониторинг», были разработаны и функционируют несколько десятков специализированных информационных научных и прикладных систем дистанционного мониторинга. Как примеры научных систем можно привести:

- Информационная система «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» VolSatView (<http://volcanoes.smislab.ru/>) [10]. Основной задачей системы является обеспечение специалистов-вулканологов оперативными спутниковыми данными и различными информационными продуктами, получаемыми на основе их обработки, для мониторинга и изучения вулканической активности Камчатки и Курил.
- Спутниковый сервис See The Sea (STS, <http://ocean.smislab.ru/>) [11] – информационная система, ориентированная на работу с данными спутниковых наблюдений для решения междисциплинарных задач исследования Мирового океана. Особое внимание в системе уделяется возможностям работы с данными спутниковой радиолокации.

Одной из наиболее крупных прикладных систем дистанционного мониторинга, использующих возможности центра, в настоящее время является Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства ИСДМ-Рослесхоз (<https://nffc.aviales.ru>) [12], предназначенная для ведения постоянного мониторинга лесных пожаров и их последствий на территории России. В 2020 году исполняется 15 лет промышленной эксплуатации этой системы [13].

Программно-аппаратный комплекс ЦКП «ИКИ-Мониторинг» построен на основе технологий и базового программного обеспечения, разработанных в отделе «Технологии спутникового мониторинга» ИКИ РАН. В частности, архивы данных реализованы на базе унифицированной технологии ведения сверхбольших распределенных архивов разнородных спутниковых данных UNISAT [7]. В реализации подсистемы обработки данных используется технология распределенной многопоточковой обработки спутниковых данных [14], позволяющая эффективно управлять работой многих десятков станций обработки спутниковых данных. Для построения специализированных картографических интерфейсов применяется разработанная в ИКИ РАН технология GEOSMIS [15]. Для решения широкого спектра задач, связанных с поддержкой бесперебойной работы сложных программно-аппаратных комплексов, в ИКИ РАН была разработана система документирования и контроля (СДКП) [16].

Перспективы развития

За последние пять лет суммарный объем данных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» увеличился более чем в три раза, что потребовало соответствующего наращивания используемых для обработки и хранения спутниковых вычислительных ресурсов. Также выросло количество различных типов спутниковых данных и информационных продуктов, получаемых на их основе, а также инструментов для их анализа и обработки. Постоянно ведутся работы по расширению доступного пользователям функционала и удобства в его использовании и стабильности работы сервисов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Совершенствуются технологии и программное обеспечение, отвечающие за реализацию всех этапов работы со спутниковыми данными, включая их сбор, архивацию, обработку и предоставление пользователям. Стремительно возрастающая сложность системы предъявляет все возрастающие

требования к организации подсистемы контроля за бесперебойной работой программно-аппаратного комплекса. Поэтому особое внимание также уделяется совершенствованию программного обеспечения, позволяющего в автоматическом режиме максимально оперативно и точно диагностировать самые разные неполадки в работе системы для своевременного их устранения.

В тоже время стремительное развитие спутниковых систем ДЗЗ приводит к экспоненциальному росту объемов поступающих в архивы спутниковых данных, для хранения и обработки которых требуется все больше дорогостоящего оборудования и постоянного расширения инфраструктуры работы с данными. Значительные усилия и ресурсы при этом требуются для обеспечения как поддержки, так и развития центра. Опыт эксплуатации ЦКП «ИКИ-Мониторинг» показывает, что в ближайшей перспективе его эффективное развитие и поддержка может стать уже невозможной на базе одной, пусть и даже достаточно крупной научной организации. Тут также следует учитывать, что размещение всего оборудования на одной площадке понижает устойчивость работы системы. Все это требует поиска новых подходов к развитию системы.

Анализ показывает, что, видимо, наиболее перспективным направлением развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг», позволяющим эффективно решать вышеперечисленные проблемы, является переход на распределенную модель построения, ориентированную на развитие информационных узлов ЦКП в крупных научных и образовательных центрах, а также в центрах приема и обработки спутниковых данных. Переход на такую модель развития в перспективе позволит создать объединенный центр коллективного пользования, в поддержке и развитии которого будут участвовать различные научные и образовательные организации. В соответствии со спецификой решаемых задач могут быть реализованы следующие основные типы информационных узлов:

- Специализированные научные узлы
- Специализированные образовательные узлы
- Специализированные узлы приема, обработки и усвоения данных

Специализированные научные узлы предназначены для проведения научных исследований, выполняемых ведущими российскими и зарубежными научными группами и коллективами, в частности, для решения следующих задач: мониторинга состояния окружающей среды, исследования атмосферных и климатических процессов, дистанционного исследования поверхности океана и ледяных покровов, применения данных ДЗЗ в задачах геологии и геофизики, дистанционного зондирования ионосферы и т.д. Использование научных узлов будет способствовать плодотворному сотрудничеству различных научных коллективов и способствовать междисциплинарным исследованиям. Такие узлы могут быть в частности развернуты в региональных научных центрах, уже имеющих опыт работы с ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Специализированные образовательные узлы предназначены для использования в различных образовательных программах и проектах и позволят обеспечить студентам доступ к спутниковым данным и к инструментам для работы с ними при выполнении практикумов, лабораторных работ, подготовки дипломных проектов и выполнения НИР. Определенный задел в этом направлении у нас уже есть, так как мы являемся базовой кафедрой Факультета космических исследований Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (<https://cosmos.msu.ru>), магистерская программа «Методы и технологии дистанционного зондирования Земли». Использование образовательных узлов позволит в будущем получить высококвалифицированные научные кадры в различных областях знаний, владеющие навыками работы с данными ДЗЗ.

Специализированные узлы приема обработки и усвоения данных предназначены для сбора и обработки данных, поступающих с современных и перспективных российских и зарубежных спутников. Основными задачами таких узлов являются автоматизированная обработка поступающих со станций приема данных, их обработка (как минимум до уровня L1B), организация надежного их хранения и обеспечение эффективных механизмов доступа к ним, включая возможности их обработки и анализа в интерактивном режиме. Также на базе таких узлов можно было бы получать продукты и более высоких уровней обработки. Отметим, что у ИКИ РАН имеется большой опыт плодотворного сотрудничества с центрами приема и обработки спутниковых данных ФГБУ «НИЦ «Планета», что объясняет заинтересованность в наращивании их возможностей, одним из вариантов которого, является установка в этих центрах информационных узлов усвоения данных.

Заключение

В настоящее время ЦКП «ИКИ-Мониторинг» предоставляет практически уникальные возможности по работе со сверхбольшими многолетними архивами спутниковых данных, получаемых с

различных российских и международных спутников ДЗЗ. Однако дальнейшее развитие центра на основе возможностей одной организации не позволяет в полной мере реализовать потенциал данных, получаемых со спутниковых систем ДЗЗ. Поэтому наиболее перспективным направлением развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг» является переход на распределенную модель построения, предполагающую развертывание информационных узлов ЦКП в крупных научных и образовательных центрах, а также в центрах приема и обработки спутниковых данных.

Работа выполнена в рамках темы "Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера" (госрегистрация №0024-2019-0014).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Кобец Д.А. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15. — № 3. — С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
2. Euroconsult. Brochure «Satellites to be built & launched by 2026». — 2017, [Электронный ресурс]. URL: <http://www.euroconsult-ec.com/research/satellites-built-launched-by-2026-brochure.pdf>
3. Zhu L. et al. A Review: Remote Sensing Sensors. — IntecOpen, 2018.
4. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12. — № 5. — С. 263–284.
5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16. — № 3. — С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. Loupian E.A., Milexin O.E., Antonov V.N., Kramareva L.S., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Tolpin V.A., Solovyev V.I. System of operation of joint information resources based on satellite data in the Planeta Research Centers for Space Hydrometeorology // Russian Meteorology and Hydrology. — 2014. — Vol. 39. — Issue 12. — P. 847-853. DOI: 10.3103/S1068373914120103.
7. Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Бурцев М.А. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — Т. 13. — № 3. — С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
8. Барталев С.А., Ершов Д.В., Лупян Е.А., Толпин В.А. Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9. — № 1. — С. 49–56.
9. Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2014. — Т. 11. — № 3. — С. 215–232.
10. Гирина О.А., Лупян Е.А., Гордеев Е.И., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Уваров И.А., Кашницкий А.В., Романова И.М., Константинова А.М., Королев С.П. (Информационная система VolSatView для комплексного анализа активности вулканов Камчатки и Курил // 4-я Всерос. научно-практическая конф. «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления»: сб. тр. Хабаровск, — 11–14 сент. 2017. — Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2017. — С. 36–39.
11. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Уваров И.А., Лупян Е.А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16. — № 3. — С. 266–287.

12. Лупян Е.А., Баргалева С.А., Ершов Д.В., Котельников Р.В., Балашов И.В., Бурцев М.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Жарко В.О., Ковганко К.А., Колбудаев П.А., Крашенинникова Ю.С., Прошин А.А., Мазуров А.А., Уваров И.А., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г., Флитман Е.В., Хвостиков С.А., Шуляк П.П. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12. — № 5. — С. 222–250.
13. Беляев А.И., Коровин Г.Н., Лупян Е.А. Использование спутниковых данных в системе дистанционного мониторинга лесных пожаров МПР РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. — 2005. — Выпуск 2. — Т. 1. — С. 20–29.
14. Кобеца Д.А., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Прошин А.А. Организация автоматизированной многопоточной обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12. — № 1. — С. 145–155.
15. Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2011. — Т. 8. — № 3. — С. 93–108.
16. Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Мазуров-мл. А.А., Мамаев А.С., Матвеев А.М., Прошин А.А. Особенности организации контроля и управления распределенных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2011. — Т. 8. — № 3. — С. 161–166

Сушкевич Т.А.

**«Будущее Земли»: радиационный фактор и сопряженные задачи
климата, экологии, эволюции Земли и космоса
(посвящается 100-летию К.Я. Кондратьева)**

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт
прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»
Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4
E-mail: tamaras@keldysh.ru

Планета Земля – естественный пример динамической системы с нелинейными процессами, находящейся в непрерывных изменениях. Древние астрономы использовали свет для наблюдений за другими планетами и звездами. Радиационное поле Земли – единое физическое поле (электромагнитное излучение) и объединяющий фактор динамической системы Земля. Климатическая система Земли – это природная среда, включающая атмосферу, гидросферу (океаны, моря, озера, реки), криосферу (поверхность суши, снег, морской и горный лед и т.д.), биосферу, объединяющую всё живое. В интересах Всемирной Глобальной Научной Программы «Будущее Земли» проблемы эволюции, климата, экологии, глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли исследуются на основе теории переноса излучения как сопряженные с учетом рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения и разделения вкладов атмосферы и океана.

Ключевые слова: Будущее Земли, радиационный фактор, теория переноса излучения.

T.A. Sushkevich

**«Future Earth»: the radiation factor and the conjugate tasks of Earth
climate, ecology, evolution and space
(dedicated to the 100th anniversary of K.Ya. Kondratiev)**

Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia
E-mail: tamaras@keldysh.ru

Planet Earth is a natural example of a dynamic system with non-linear processes that is in continuous change. Ancient astronomers used light to observe other planets and stars. The radiation field of the Earth is a single physical field (electromagnetic radiation) and a unifying factor of the Earth's dynamic system. The Earth's climate system is a natural environment that includes the atmosphere, hydrosphere (oceans, seas, lakes, rivers), cryosphere (land surface, snow, sea and mountain ice, etc.), and biosphere that unites all life. In the interest of the World Global Research Projects «Future Earth», the problems of evolution, climate, ecology, global monitoring and remote sensing of the Earth are investigated on the basis of the radiation transfer theory as the conjugate problems taking into account the scattering and absorption of the solar and own radiation and the separation of the atmospheric and ocean contributions.

Keywords: Future Earth, radiation factor, radiation transfer theory.

Введение

Посвящается Кириллу Яковлевичу Кондратьеву (14.06.1920–01.05.2006, член-корреспондент АН СССР с 26.11.1968 – Отделение наук о Земле, академик с 26.12.1984 – Отделение океанологии, физики атмосферы и географии (физика атмосферы), профессор с 1958 г.) в год 100-летия со дня его рождения и 75-летия Великой Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг., участником которой он был. 2020 год – это год 75-летия «Атомного проекта» [1], в недрах которого зародился проект «Ракетно-ядерный щит», породивший «Космический проект». Эти проекты подняли уровень наук о Земле и значимость К.Я. Кондратьева как крупного Ученого и Лидера.

Три русских гения – «Три К» – Мстислав Всеволодович Келдыш (10.02.1911–24.06.1978) – академик с 1946 г., Главный Теоретик космонавтики, Трижды Герой Социалистического Труда (1956,

1961, 1971), Президент АН СССР (1961–1975); Сергей Павлович Королев (12.01.1907–14.01.1966) – академик с 1958 г., Главный Конструктор космонавтики, Дважды Герой Социалистического Труда (1956, 1961); Игорь Васильевич Курчатов (12.01.1903–07.02.1960) – академик с 1943 г., «Отец русской атомной бомбы», Трижды Герой Социалистического Труда (1949, 1951, 1954) – возглавили и совершили научно-техническую революцию (НТР) в середине XX-го века, и их имена навечно вошли в историю мировой цивилизации, СССР и России.

14 февраля 1954 г. в кабинете М.В. Келдыша прошло первое совещание по искусственному спутнику Земли [2]. Под общим руководством М.В. Келдыша Кирилл Яковлевич Кондратьев [3], Гурий Иванович Марчук (08.06.1925–24.03.2013, академик с 1968 г., последний Президент АН СССР (1985–1991)) [4], Юрий Антонинович Израэль (15.05.1930–23.01.2014, академик с 1994 г., Нобелевская премия мира 2007 г. за «усилия и работу по распространению знаний об изменениях климата и принятию мер в целях пресечения распространения негативных процессов») [5] – три советских Ученых – стали Лидерами, которые фактически руководили становлением и развитием космической отрасли в интересах наук о Земле и международного сотрудничества в космосе и представляли СССР за рубежом.

Война и ЛГУ – начало научного пути К.Я. Кондратьева

Путь к науке К.Я. Кондратьева, как и у всех патриотов того поколения, что родились в СССР после Октября 1917 г., шел через военные испытания и бытовые трудности, но это были годы подъема и дальнейшего расцвета науки и образования. В 1925 г. торжественно отметили 200-летие Российской академии наук и была создана Великая Академия Наук СССР, под руководством которой были подготовлены и мобилизованы научные, педагогические и инженерные кадры.

В 1938 г. К.Я. Кондратьев поступил на физический факультет Ленинградского Ордена Ленина государственного университета имени А.А. Жданова (ЛОЛГУ, ЛГУ). Отец – офицер Красной армии, так что, когда началась война, в 1941 г. после третьего курса Кирилл добровольцем ушел на фронт и был демобилизован только после третьего ранения. А когда сняли блокаду, в 1944 г. вернулся в Ленинград и продолжил учебу в университете. В 1946 г. Кирилл окончил ЛГУ «с отличием» по специальности «геофизика» и был оставлен на кафедре «физика атмосферы» (первая в СССР кафедра создана в 1930 г.) ассистентом заведующего кафедрой профессора Павла Николаевича Тверского (10.11.1892–29.12.1962). К.Я. Кондратьев в КПСС вступил в 1943 г. на фронте. Его организационные способности формировались во время общественной работы: К.Я. Кондратьева избрали руководителем комсомольской организации ЛГУ.

К.Я. Кондратьев был государственным организатором науки, образования и стратегических проектов покорения космоса оборонного и народно-хозяйственного назначения. В возрасте 44 лет К.Я. Кондратьев был назначен ректором ЛГУ (1964–1970) и оказал существенное влияние на подготовку кадров и развитие космонавтики в СССР как последовательный сторонник «пилотируемой космонавтики», «метеорологических спутников» и космических технологий для изучения Земли и других планет.

Радиационный фактор и лучистая энергия

Лучистая энергия – основной источник энергии для всех процессов, совершающихся на земном шаре. В 1925–1927 гг. Е.С. Кузнецов [6] первым в СССР занялся исследованием солнечного излучения и лучистой энергии в связи с вопросами атмосферной оптики, переноса теплового излучения в атмосфере и климата и впервые в области метеорологии связал эти вопросы с кинетическим уравнением и опубликовал первые в СССР и в мировой науке статьи: «Об установлении баланса лучистой энергии в поглощающей и рассеивающей среде» (1940) и «Лучистый теплообмен в движущейся жидкой среде» (1941).

К.Я. Кондратьев ссылается на эти статьи в своих публикациях 1947–1956 гг. Богатейшее научно-литературное наследие К.Я. Кондратьева насчитывает более тысячи публикаций и докладов [3]. Его первая статья «О поглощении длинноволновой радиации в атмосфере» появилась в 1947 г. в журнале «Метеорология и гидрология», а 15.11.1948 г. К.Я. Кондратьев защищает в ЛОЛГУ кандидатскую диссертацию физико-математических наук на тему «Некоторые вопросы лучистого теплообмена в атмосфере». В 1950 г. вышла первая книга К.Я. Кондратьева «Перенос длинноволнового излучения в атмосфере». Это не только путь к сложнейшим задачам физики атмосферы и прогноза климата, но это первая в СССР и мире монография о «переносе лучистой энергии» – практически одновременно с монографией С. Чандрасекара «Перенос лучистой энергии» (1950) [7], в 1953 г. изданной на русском языке под редакцией Е.С. Кузнецова. В 1954 г. К.Я. Кондратьев издает книгу «Лучистая энергия Солнца», а в 1956 г. защищает докторскую диссертацию на тему «Перенос лучистой энергии в атмосфере» и публикует

монографию «Лучистый теплообмен в атмосфере». К.Я. Кондратьев был постоянным представителем в Международной Радиационной комиссии [8] и принимал активнейшее участие в организации Международных радиационных симпозиумов (IRS). В 1964 г. симпозиум IRS прошел впервые в СССР в Ленинграде [9], а в 2000 г. симпозиум проходил в Санкт-Петербурге и был приурочен к 80-летию К.Я. Кондратьева.

К.Я. Кондратьев – единственный в мире Ученый и академик АН СССР и РАН, в научной и педагогической деятельности которого воплотилось масштабное единство исследований «Земли и Космоса» на протяжении всей творческой жизни. К.Я. Кондратьев впервые ввел несколько научных понятий, связанных с радиационным фактором, такие как «парниковый эффект» (1953), «радиационные факторы погоды и климата» (1968). Он заложил фундаментальные основы новой науки «Земля и Космос»: «спутниковая метеорология» (1961, 1962), «радиационный баланс Земли как планеты» (1962) «поле излучения Земли как планеты» (1963, 1964), «космическая метеорология» (1966), «космические цвета Земли» (1970), «космические методы земледения» (1971), «спутниковая климатология» (1971), «исследования природной среды из космоса» (1971), «климат планеты» (1972), «космическая дистанционная индикация параметров окружающей среды и природных ресурсов» (1975), «космическая экология» (1975), «космос и география» (1980), «дистанционное изучение почв и растительности, криологии, гидрологии и океанологии» (1981), «космическое земледение» (1981) и т.д. Эти термины фактически отражают исследовательские проблемы и задачи.

Радиационный фактор и «Будущее Земли»

Глобальный вызов Конвенции «Повестка дня на XXI век» (Agenda 21), принятой на Конференции ООН по окружающей среде и развитию, Рио-де-Жанейро, 1992 г., Резолюции «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», принятой Генеральной Ассамблеей ООН 25 сентября 2015 г. (Agenda 2030), и проект, не имеющий аналогов по масштабам и значимости для человечества в мировой истории, – это Всемирная Глобальная Научная Программа «Будущее Земли» [10] под эгидой «Международного научного совета» (ISC) [11].

На «Глобальном форуме по защите окружающей среды и развитию в целях выживания» (Москва, январь 1990 г.) обсудили темы: «Земля и человеческое общество», «Человек и природа», «За выживание и развитие человечества», «Технология, промышленность, урбанизация: экологические проблемы здоровья» и др. В обращении ученых АН СССР при участии академиков Г.И. Марчука, Н.Н. Моисеева, А.Л. Яншина, Ю.А. Израэля, К.Я. Кондратьева, Г.С. Голицына и др., предлагалось разработать международный кодекс экологической этики.

Скорость света такова, что исследуемый объект можно считать «стационарным», и в теории переноса излучения практически решаются стационарные кинетические уравнения без временной зависимости [12]. Речь идет о «радиационных» задачах Программы. Сложнейшие проблемы эволюции, климата, экологии, глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли с гиперспектральными подходами предлагается рассматривать как сопряженные – это прямые и обратные задачи теории переноса излучения, молекулярная спектроскопия и взаимодействие излучения с веществом. Радиационное поле Земли – единое физическое поле (электромагнитное излучение) и объединяющий фактор динамической системы Земля. Для количественных оценок значимости разных климатообразующих факторов, зависящих от солнечного и собственного излучения, ввели специальную характеристику – *радиационное воздействие (форсинг)*. От 40% до 60% воздействия разных факторов на эволюцию климата приходится на радиационный форсинг.

Во-первых, солнечное излучение – источник энергии на Земле – один из неотъемлемых факторов жизнеобеспечения человека, животного и растительного мира. Во-вторых, лучистая солнечная энергия – одна из определяющих компонент земной экосистемы и биосферы, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма, т.е. обратных связей, которые иногда приводят к взаимоусилению различных процессов. В-третьих, коротковолновое солнечное излучение, падая на Землю, поглощается в атмосфере облаками, аэрозолями и озоном, поверхностью Земли и океанов, а потом переизлучается в длинноволновый спектр. Это длинноволновое излучение поглощается «парниковыми газами» – углекислым газом, водяным паром, метаном и другими газами – и греет атмосферу. В-четвертых, поле солнечного излучения влияет на механизмы изменчивости (динамические процессы: циркуляция, конвекция, турбулентный перенос; радиационные и фотохимические процессы) геофизического, метеорологического, климатического состояния Земли, которые обладают сложными нелинейными связями, затрудняющими предсказание возможных эффектов, оценку их величины и

значимости. В-пятых, электромагнитное излучение, регистрируемое разными средствами, является основным источником информации о строении и физических свойствах планетных атмосфер, поверхностей, океана, биосферы при консервативном дистанционном зондировании.

Заключение

Исследования радиационного поля Земли – это масштабные задачи, которые никогда не имеют завершения, поскольку «атмосфера–суша–океан» – это динамическая система с непредсказуемым состоянием. Непреодолима сложность проблемы состоит в том, что для исследований планеты не допустимы натуральные эксперименты и возможны только мониторинг и наблюдения разными средствами, с одной стороны, а с другой стороны на момент измерений радиации невозможно восстановить весь набор оптико-геофизических и оптико-метеорологических параметров системы, от которых зависит радиация, и невозможно повторить условия наблюдений, так как среда непрерывно изменяется и никогда не повторяется. И только математическое моделирование позволяет провести теоретико-расчетные исследования столь сложных проблем и получить качественные и количественные оценки для анализа и прогнозов.

К.Я. Кондратьев в последние годы жизни подготовил с единомышленниками две большие монографии по ключевым проблемам современности и будущего: «Перспективы развития цивилизации. Многомерный анализ» [13] и «Свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля от нано- до глобальных масштабов» [14]. Монография [14], изданная в 2007 г. уже после кончины К.Я. Кондратьева, – это великолепный образец постановки и решения сопряженных задач от микро-мира нано-размеров до глобальной климатической системы.

Исследование частично поддержано РФФИ (проекты 18-01-00609, 17-01-00220).

ЛИТЕРАТУРА

1. История Росатома. Атомный проект СССР. Электронная библиотека <http://elib.biblioatom.ru/sections/0201/> (дата обращения 10.04.2020).
2. Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 416 с.
3. Научно-литературное наследие Кирилла Яковлевича Кондратьева. URL: <http://www.ecosafety-spb.ru/index.php/memo-cabinet?id=77> (дата обращения: 10.04.2020).
4. Наш Марчук. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2015. 428 с.
5. Нобелевская премия за исследования климата. Интервью с академиком Ю.А.Израэлем // Век глобализации. 2008. № 1. С. 83–85.
6. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды (в связи со 100-летием со дня рождения) / Ответ. ред. и состав. Т.А. Сушкевич. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
7. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / Пер. с англ. издания Oxford, 1950, под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.
8. International Radiation Commissions 1896 to 2008: Research into Atmospheric Radiation from IMO to IAMAS / Compiled by Hans-Jürgen Bolle from IRC documents as well as publications and notes by Fritz Möller and Julius London. Germany, May 2008. 138 p.
9. Розенберг Г.В. Международный симпозиум по исследованию радиационных процессов // УФН. 1965. Т. 85. № 3. С. 564–577.
10. Future Earth. World Global Research Projects. URL: <http://futureearth.org>; (дата обращения: 10.04.2020)
11. The International Science Council (ISC) URL: <https://council.science/> (дата обращения: 10.04.2020)
12. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
13. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Перспективы развития цивилизации. Многомерный анализ. М.: Логос, 2003. 573 с.
14. Кондратьев К.Я., Иевлев Л.С., Крапивин В.Ф. Свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля от нано- до глобальных масштабов. СПб.: ВВМ, 2007. 860 с.

Тимофеев Ю.М.

**Дистанционные методы исследования атмосферы
(кафедра физики атмосферы ЛГУ + СПбГУ)**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Исследования в области дистанционных методов измерений параметров атмосферы Земли и планет были начаты по инициативе академика К.Я. Кондратьева на кафедре физики атмосферы СПбГУ (ранее ЛГУ) еще в начале 60-х годов 20 столетия. В течение более 50 лет на кафедре физики атмосферы разрабатываются и применяются спутниковые и наземные дистанционные методы измерений с использованием УФ, видимой, БИК, ИК и МКВ областей спектра и различной геометрии измерений. Рассматривались и применялись различные пассивные методы, а именно, методы прозрачности, собственного (теплого и неравновесного) излучения атмосферы, рассеянного и отраженного солнечного излучения. Обобщена информация о методах дистанционного зондирования, исследованных и реализованных в СПбГУ для определения различных параметров атмосферы и поверхности. **Ключевые слова:** пассивные дистанционные методы, спутниковые и наземные методы, атмосфера Земли и планет.

Yuri M. Timofeev

**Remote sensing of atmosphere
(Department of Atmospheric Physics LGU + SPbSU)**

Saint Petersburg State University
7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034 Russia
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Studies in the field of remote methods for measuring the parameters of the Earth's atmosphere and planets was initiated by academician K.Ya. Kondratyev at the Department of Atmospheric Physics of St. Petersburg State University (formerly LGU) in the early 60s of the 20th century. For more than 50 years, the Department of Atmospheric Physics has been developing and applying satellite and ground-based remote measurement methods using UV, visible, IR and MV spectral ranges and various measurement geometries. Various passive methods were considered and applied, namely, methods of transparency, natural (thermal and non-equilibrium) radiation of the atmosphere, scattered and reflected solar radiation. Information on remote sensing methods studied and implemented at Saint Petersburg State University to determine various parameters of the atmosphere and surface is summarized.

Keywords: passive remote methods, satellite and ground-based methods, atmosphere of the Earth and planets.

Кирилл Яковлевич Кондратьев руководил кафедрой физики атмосферы в ЛГУ в 1958–1977 годах. За это время по инициативе К.Я. Кондратьева было кардинально преобразовано обучение на кафедре, начаты важные новые научные и прикладные исследования, значительно возросло финансирование (прежде всего за счет хоздоговоров), непрерывно росла численность научного и учебного персонала, а также число студентов (достигавшее 30 человек), обучавшихся на кафедре. Одним из таких актуальных направлений исследований была разработка и реализация дистанционных методов зондирования атмосферы. Важную роль в развитии этих исследований сыграли обзоры и монографии, опубликованные К.Я. Кондратьевым еще в начале 60-х годов 20 столетия (см., например, [1–11]).

Первая наша совместная с К.Я. Кондратьевым работа была написана на основе моего диплома и посвящена особенностям формирования уходящего теплового излучения атмосферы в 15 мкм полосе CO₂ [12]. В работе показано, что в разных спектральных интервалах этой полосы уходящее излучение формируется на разных высотах и, если нам известно содержание CO₂, можно определить вертикальный профиль температуры. Важно, что эта статья была переведена и опубликована в международном журнале.

Уже в следующем году была опубликована статья, посвященная возможностям определения градиента температуры в поверхностном слое воды [13].

В течение более 50 лет на кафедре физики атмосферы разрабатываются и применяются спутниковые и наземные методы восстановления параметров атмосферы и подстилающей поверхности с использованием УФ, видимой, БИК, ИК и МКВ областей спектра и различной геометрии измерений, а именно, методы прозрачности, собственного (теплового и неравновесного) излучения атмосферы, рассеянного и отраженного солнечного излучения.

Развитие и реализация дистанционных методов зондирования на нашей кафедре, в содружестве со многими учеными Росгидрометслужбы, РАН и т.д., осуществлялось в различных направлениях:

- физико-математические основы дистанционных методов зондирования,
- численное моделирование и оценки погрешностей различных методов,
- расчетные и экспериментальные исследования характеристик поглощения атмосферы,
- математические аспекты решения некорректных, в классическом смысле, обратных задач атмосферной оптики,
- численный анализ информативности и оптимальных условий измерений,
- опытная реализация наземных и спутниковых дистанционных методов исследования атмосфер планет (Земля, Венера, Марс, Сатурн),
- создание программно-математического обеспечения,
- регулярный мониторинг параметров атмосферы как с помощью наземных, так и спутниковых измерений,
- сравнения различных наземных и спутниковых дистанционных измерений атмосферных параметров,
- валидация спутниковых измерений,
- сравнения измерений и результатов численного трехмерного моделирования параметров атмосферы,
- исследования долговременных трендов климатически и экологически важных атмосферных газов,
- оценки антропогенных эмиссий различных газов.

Эти и другие исследования осуществлялись на основе интерпретации измерений следующих спутниковых приборов:

1. МИСЗ «Метеор» – дифракционный спектрометр (ЦАО) – температурное зондирование атмосферы.
2. Озон-Мир (СПбГУ, космический модуль «Мир») – вертикальные профили содержания озона и аэрозоля.
3. CRISTA (ФРГ) – кинетическая температура, колебательные температуры, профили содержания CO_2 , O_3 и аэрозоля.
4. SAGE III (РФ + США) – профили содержания озона, двуокиси азота, коэффициента аэрозольного ослабления, микроструктуры аэрозоля.
5. SEVIRI (EUMETSAT) – карты общего содержания озона.
6. ИКФС-2 (МИСЗ «Метеор», РФ) – вертикальные профили температуры, влажности, содержания озона, радиационного форсинга CO_2 .

Наземные приборы – СИКС, МКВ-озон, МКВ радиометр RPG-HATPRO, Bruker IFS 125HR, OCEAN-OPTICS, CIMEL и другие, позволили получать дистанционно и регулярно огромное количество информации о многих параметрах атмосферы (см. табл. 1). В таблице 1 приведены параметры атмосферы и поверхности, возможность восстановления которых различными дистанционными методами с использованием разных типов излучения и областей спектра исследована и часто реализована на кафедре физики атмосферы.

Методы дистанционного зондирования, исследованные и реализованные в СПбГУ для определения различных параметров атмосферы и поверхности

NN	Параметр	Область спектра	Дистанционный метод	Примечания
1	Профиль температуры	15 мкм	Тепловое излучение, спутник	Реализован на МИСЗ «Метеор»
2	Градиент температуры в водной среде	8–12 мкм	Тепловое излучение	Оценки точности
3	Влажность в стратосфере	МКВ	Прозрачность на касательных трассах	Оценки точности
4	Профиль температуры	15 мкм	Тепловое излучение, наземный	Опытные измерения
5	Функции пропускания атмосферы	15 мкм	Тепловое излучение	Оценки точности
6	Профиль водяного пара	ИК	Тепловое излучение, спутник	Реализован на МИСЗ «Метеор»
7	Профиль температуры	ИК	Тепловое излучение	Марс, Венера, Сатурн, анализ точности, примеры определения
8	Температура океанов	ИК	Тепловое излучение	Реализован
9	Температура суши	ИК	Тепловое излучение	Реализован
10	Излучательные способности суши	ИК	Тепловое излучение	Оценки точности
11	Влажность почв	МКВ	Тепловое излучение	Оценки точности
12	Общее содержание газов	ИК	Прозрачность	25 газов, наземные измерения
13	Характеристики аэрозолей (спутники)	ВИД и БИК	Прозрачность	Оптические толщ, функции распределения
14	Характеристики аэрозолей, наземные	ВИД и БИК	Прозрачность и рассеяние	Оптические толщ, функции распределения
15	Профиль озон	УФ, ИК, МКВ	Прозрачность и тепловое излучение	Наземные измерения
16	Общее содержание озона	УФ, ИК	Тепловое и рассеянное излучения	Спутниковые измерения
17	Водность облаков	МКВ	Тепловое излучение	Наземные измерения
18	Содержание CO ₂	ИК	Тепловое излучение, прозрачность	Наземные и спутниковые измерения
19	Тренды газов	ИК	Прозрачность	Наземные измерения
20	Интенсивности эмиссий	ВИД	Прозрачность, рассеяние	Спутниковые и наземные измерения
21	Радиационный форсинг CO ₂	ИК	Тепловое излучение	Спутниковые измерения
22	Вертикальный профиль аэрозоля	O ₂ полоса 0.76 мкм	Рассеяние	Оценки точности
23	Колебательные температуры	ИК	Собственное излучение	Спутниковые измерения

Мы не приводим полный список литературы, где изложены результаты наших многочисленных исследований, а рекомендуем воспользоваться сайтом лаборатории [14], где приведены наши публикации с 1995 года. Приведем только ссылки на монографии, опубликованные в последние десятилетия [15–18].

Из других важных результатов деятельности К.Я. Кондратьева и кафедры физики атмосферы отметим проведение в Ленинграде и Санкт-Петербурге двух Международных симпозиумов по атмосферной радиации (1964 и 2000 гг.), а также регулярных Международных симпозиумов по атмосферной радиации и динамике (МСАРД, каждые два года, начиная с 1999 года).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев К.Я. Метеорологические исследования с помощью ракет и спутников / Л., Гидрометеиздат, 1962, 252 с.
2. Кондратьев К.Я. Метеорологические спутники / Л., Гидрометеиздат, 1963, 312 с.
3. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников / Л., Гидрометеиздат, 1970, 365 с.
4. Кондратьев К.Я., Виноградов Б.В. Космические методы землеведения / Л., Гидрометеиздат, 1971, 191 с.
5. Кондратьев К.Я., Береговой Г.Т., Бузников А.А., Васильев О.Б., Виноградов Б.В., Волков В.Н., Гонин Г.Б. Исследования природной среды с пилотируемых орбитальных станций / Л., Гидрометеиздат, 1972, 400 с.
6. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса / Л., Гидрометеиздат, 1978, 280 с.
7. Кондратьев К.Я. Григорьев А.А., Рабинович Ю.И., Шульгина Е.М. Метеорологическое зондирование подстилающей поверхности из космоса / Л., Гидрометеиздат, 1979, 274 с.
8. Кондратьев К.Я. Спутниковая климатология / Л., Гидрометеиздат, 1983, 264 с.
9. Кондратьев К.Я., Мелентьев В.В. Космическая дистанционная индикация облаков и влагосодержания атмосферы / Л., Гидрометеиздат, 1987, 264 с.
10. Кондратьев К.Я., Федченко П.П., Козодеров В.В., Топчиев А.Г. Биосфера. Методы и результаты дистанционного зондирования / М., Наука, 1990, 223 с.
11. Кондратьев К.Я., Мелентьев В.В., Назаркин В.А. Космическая дистанционная индикация акваторий и водосборов (микроволновые методы) / Л., Гидрометеиздат, 1992, 248 с.
12. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. О тонкой структуре спектра теплового излучения атмосферы Земли // Космические исследования. 1964. Т. 2. № 4.
13. Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование поверхностного слоя воды // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1965. № 7.
14. Сайт: http://troll.phys.spbu.ru/publication_1.html
15. Timofeyev Yu.M., Vasiliev A.V. Theoretical Fundamentals of Atmospheric Optics / Cambridge International Science Publishing Ltd., UK, 2008, 480 pp.
16. Тимофеев Ю.М. Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности / Санкт-Петербург, СПбГУ, физфак, 2010, 129 с.
17. Тимофеев Ю.М. Исследования атмосферы Земли методом прозрачности / СПб., Наука, 2016, 367 с.
18. Васильев А.В., Огибалов В.П., Тимофеев Ю.М. Численные методы теории переноса излучения / Учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2017, 305 с.

**Тронин А.А., Горный В.И. *, Киселев А.В., Крицук С.Г.,
Латыпов И.Ш.**

Спутниковое картирование тепловой реакции экосистем Северной Европы на изменение климата

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,

Корпусная ул., д. 18, г. Санкт-Петербург, 197110, Россия

* E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

Цель статьи – выявление пространственно-временных вариаций дистанционно измеренной температуры поверхности экосистем Северной Европы, которые могут быть вызваны изменением климата или антропогенными факторами. Для построения карты скорости изменения температуры поверхности экосистем к материалам съемки спутником Aqua(MODIS) за период с 2002 по 2019 гг. применен попиксельный регрессионный анализ. Результаты показали, что не наблюдается общих для всей территории Северной Европы тенденций к повышению температуры поверхности экосистем. Нагрев отмечен на архипелаге Новая Земля, Полярном Урале, незначительных по площади участках Кольского полуострова и в Прибалтике. Полученный результат противоречит существующим выводам климатологов, основанных на результатах многолетних наблюдений за температурой воздуха на метеостанциях. Рассмотрены возможные факторы, определившие это противоречие. На территории Финляндии по аномально высокой скорости нагрева локального участка идентифицирован новый горно-металлургический комплекс. В связи с тем, что точно известна дата его строительства предложено использовать этот техногенный объект как «эталонный» для изучения последующих изменений дистанционно-измеренных характеристик подстилающей поверхности, индицирующих реакцию окружающих лесных экосистем на техногенное воздействие.

Ключевые слова: Северная Европа, экосистемы, спутник, картирование, температура поверхности, многолетние тренды, техногенное воздействие.

**Andrei A. Tronin, Victor I. Gornyy*, Andrei B. Kiselev, Sergei G. Kritsuk,
Iscander Sh. Latypov**

Satellite mapping of thermal response of ecosystems of North Europe on climate change

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences,

18, Korpusnaya st., St. Petersburg, 197110, Russia

*E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

The objective of the article is to identify the spatio-temporal variations of the remotely measured temperatures of the ecosystem surface in Northern Europe, which can be caused by climate change or anthropogenic factors. The results of shootings carried out by the Aqua(MODIS) satellite during the period from 2002 up to 2019 were used to compile a map of multi-year trend of the land surface temperature. The pixel by pixel regression analysis to the multi-year time series of the land surface temperature was applied. The results showed that there are no general land surface temperature elevation within entire Northern Europe. Heating was noted at the Novaya Zemlya Archipelago, the Polar Urals, and many local areas of the Kola Peninsula, as well as, in the Baltic States. This result contradicts to the existing conclusions of climatologists, based on the long-term observations of air temperature at weather stations. Possible factors determining this contradiction are discussed. A new mining and metallurgical complex has been identified in Finland by an anomalously high heating rate of a local site. The exact date of this enterprise foundation is known. That is why it is proposed to use this technogenic object as a “standard” one to study further time-spatial variations of forest ecosystems response on anthropogenic loading.

Keywords: Northern Europe, ecosystems, satellite, mapping, land surface temperature, long-term trends, technogenic impact.

Введение

Академик К.Я. Кондратьев отмечал, что в связи с формированием над городами «тепловых островов» [1] прогнозы глобального потепления, полученные с помощью физических многопараметрических моделей, опирающиеся на данные мировой сети метеорологических наблюдений, могут быть завышены [2, 3]. Еще одним спорным моментом этого прогноза, отмеченным К.Я. Кондратьевым, является субъективный выбор значений параметров многопараметрических физических моделей [2, 3].

Известно, что при столкновении различных научных позиций необходимо, прежде всего, обращать внимание на качественный характер изменений наблюдаемых явлений, которые наиболее надежно позволяют судить о справедливости обсуждаемой гипотезы. Представляется, что накопленные за последние десятилетия обширные архивы результатов ежедневных тепловых космических съемок, выполненных спутниками системы EOS, позволят приблизиться к разрешению сформулированного К.Я. Кондратьевым научного конфликта. Поэтому целью настоящей статьи является выявление качественных изменений пространственно-временной динамики дистанционно измеренной температуры поверхности экосистем Северной Европы, которые могут быть вызваны изменением климата или антропогенными факторами.

Материалы и методы

Для изучения возможного влияния потепления климата на температуру земной поверхности в Северной Европе, по результатам космических съемок спутником Aqua(MODIS) были построены карты скорости изменения температуры поверхности экосистем. Для этого, за период 2002–2019 гг. использовано 2232 стандартных цифровых ежедневных глобальных продуктов MYD11A1 версии номер 6 [4]. В наших широтах этот спутник выполняет съемку два раза в сутки – днем в интервале времени близком к периоду максимального прогрева поверхности экосистем (около 14 ч МСК) и, соответственно ночью (около 2 ч МСК). Температурная чувствительность инфракрасных датчиков сканера MODIS составляет около 0,05 - 0,07K [5]. Пространственное разрешение этих материалов 1 км x 1 км.

Для каждого пикселя карты строился временной ряд дневных температур поверхности экосистем. В этом ряду, для каждого года плавающим окном шириной в 31 день находились даты начала и окончания самого теплого 31 дневного периода года и вычислялось среднее значение температуры поверхности экосистем за этот период. Далее, для каждого пикселя карты строился временной ряд из средних дневных температур самого теплого 31 дневного периода, соответствующих каждому году наблюдений, по которому с помощью линейного регрессионного анализа определялась скорость изменения этой температуры (рис. 1).

Результаты

Результатом явилась карта скорости изменения температуры поверхности экосистем Северной Европы (рис. 2).

Визуальный анализ карты показывает, что в пределах Северной Европы высокие скорости нагрева земной поверхности, достигающие +0,10°C/год, наблюдаются на Полярном Урале (рис. 1А и 1 на рис. 2), архипелаге Новая Земля, на Кольском полуострове и в Прибалтике (рис. 2). Область высоких скоростей нагрева отмечена в пределах острова Южный архипелага Новая Земля, где совсем недавно по геологической шкале времени произошла деградация покровного ледника [6].

Наряду с территориями, на которых не отмечено достоверных изменений температур (белый, бледно синий и бледно красный цвета на рис. 2), наблюдается обширная область с высокой скоростью охлаждения поверхности экосистем, достигающей -0,40°C/год и более (например, рис. 1 Б. и точка Б на рис. 2). В то же время, на метеостанции г. Сыктывкар не наблюдается сколько-нибудь значительных многолетних тенденций к изменению температуры воздуха (рис. 1В), хотя она находится внутри обширной области охлаждающихся экосистем.

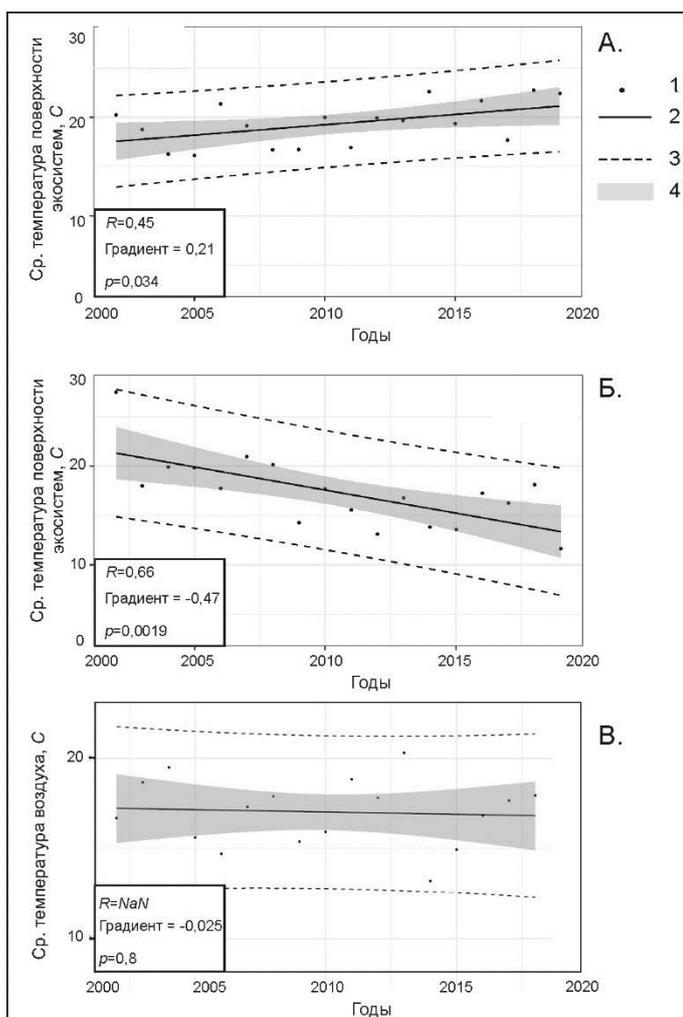


Рис. 1. Результаты регрессионного анализа скоростей изменения температур в следующих точках:

(А) Температура поверхности экосистем, Прибалтика - А на рис. 2.

(Б) Температура поверхности экосистем, район г. Ухта - Б на рис.

(В) Температура воздуха на метеостанции г. Сыктывкар.

Условные обозначения:

1. Значения средних температур поверхности экосистем за самый теплый 31 дневной период года.
2. Линия регрессии.
3. Граница доверительного интервала оценки с вероятностью 95% .
4. Доверительный интервал регрессии с вероятностью 95% .

Необходимо отметить, что за период исследований (2002–2019 гг.) большинство территорий Северной Европы, в том числе и Ленинградская область, характеризуется очень незначительным понижением температуры около от $-0,05^{\circ}\text{C}/\text{год}$ до $-0,08^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (при низком уровне достоверности результатов регрессионного анализа), т. е. остается практически неизменной.

Особое внимание вызывает локальная область высокой скорости нагрева поверхности экосистем (Г на рис. 2), выявленная в Финляндии на фоне практически стабильно слабо охлаждающихся таежных экосистем этой страны.

Анализ карты (рис. 2) позволяет отметить, что в пределах Северной Европы:

- не наблюдается общего нагрева поверхности экосистем региона за последние 17 лет, которое могло бы отражать глобальное потепление. Большая часть территории Северной Европы, особенно подзона северной тайги, характеризуется либо стабильным термодинамическим состоянием, либо незначительным темпом охлаждения поверхности экосистем, скорость которого лежит в диапазоне от $0,00^{\circ}\text{C}/\text{год}$ до $-0,08^{\circ}\text{C}/\text{год}$. При этом, следует отметить, низкую достоверность результатов регрессионного анализа, что может быть следствием недостаточной статистики и указывает на необходимость продолжения наблюдений;
- в пределах арктической пустыни (архипелаг Новая Земля), тундры и лесотундры (Полярный Урал, Кольский полуостров) и в подзоне средней тайги (Прибалтика) отмечен нагрев поверхности экосистем, скорость которого достигает $+0,1^{\circ}\text{C}/\text{год}$;
- на территории Финляндии выявлен локальный участок с очень высокой скоростью нагрева, требующий дополнительного анализа его генезиса.

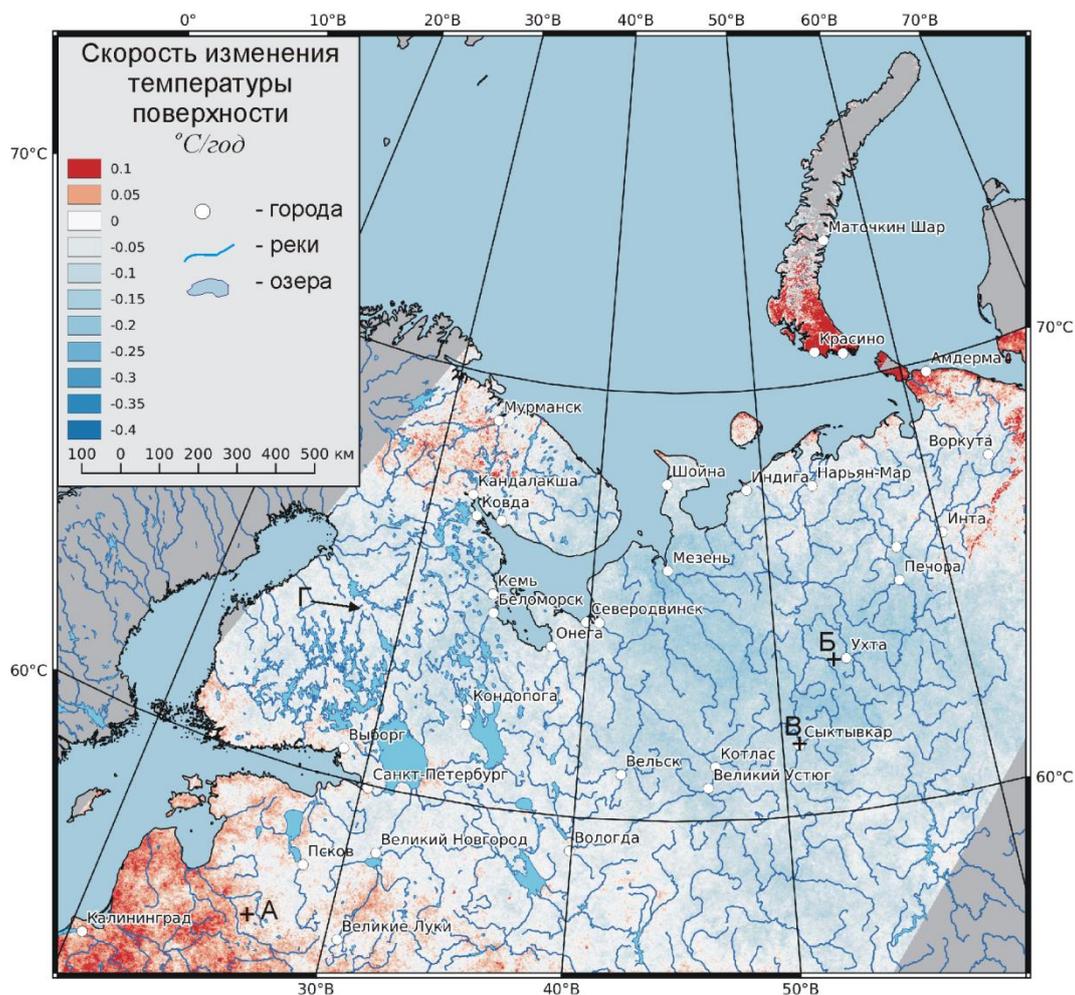


Рис. 2. Цифровая карта скорости изменения средней температуры поверхности экосистем самого теплого месяца, построенная для Северной Европы по материалам съемки спутником Aqua(MODIS).
 Условные обозначения: А. Точка соответствующая нагреву поверхности экосистем (см. график на рис. 1А); Б. Точка, где отмечена высокая скорость охлаждения поверхности экосистем (см. рис. 1Б);
 В. Местоположение метеостанции г. Сыктывкар (см. график на рис. 1В).
 Г. Локальный объект на территории Финляндии с высокой скоростью нагрева

Обсуждение результатов

Как выше отмечено, большая часть территории Северной Европы, характеризуется, как минимум, не нагревом, а отдельными территориями охлаждением поверхности экосистем. Следует отметить, что этот результат качественно противоречит выводам, изложенным климатологами (рис. ОР1.3 в [7]), где вся эта территория нагревается летом. Между тем, сравнение карт (рис. 2 настоящей статьи) и рис. ОР1.3 в [7] показывает, что общая форма пространственного распределения скоростей изменения температур близка в обоих случаях. Например, наибольшая скорость роста температуры воздуха на рис. ОР1.3 в [7] отмечается на Новой Земле и Полярном Урале. Такая же картина наблюдается и на рис. 2 настоящей статьи.

Отмеченные различия могут быть вызваны следующими причинами:

- продолжительность периода, для которого построена карта на рис. 2 составляет 31 день, т.е. в три раза меньше трех месяцев лета, для которых выполнены расчеты на рис. ОР1.3 в [7]. В результате, если в целом за летний период температура монотонно возрастала, но при этом несколько снижалась средняя за самый теплый месяц года температура поверхности экосистем, т.е. на графике уровень летних температур поднялся, но стал менее выпуклым, то это могло привести к различиям в результатах спутникового мониторинга и данных климатологов [7];

- уровень достоверности скоростей изменения температуры поверхности экосистем на рис. 2 не достаточен, особенно в области малых значений скоростей. Значения близкие к нулевой скорости, как правило, мало достоверные. Тем не менее, это указывает только на то, что значительного многолетнего нагрева поверхности экосистем в самые теплые месяцы всего исследованного периода (с 2002 г. по 2019 г.) не наблюдалось на большей части исследованной территории;
- результаты, приведенные на рис. ОР1.3 в [7], основаны на точечных наблюдениях за температурой воздуха на стандартных метеостанциях, располагаемых на покрытых травой площадках. Спутник же регистрирует инфракрасное-тепловое излучение поверхности экосистем со всей площади мгновенного поля зрения сканера в ~ 1 км². При этом, большая часть исследуемой территории покрыта лесными экосистемами, теплообмен которых отличается от теплообмена травяного покрова. Известно, что температура поверхности лесных экосистем ниже по сравнению с вырубками [8]. Это вызвано тем, что эвапотранспирация лесных экосистем выше, чем у травяного покрова. По данным климатологов на большей части исследованной территории количество осадков за период с 1936 по 2010 гг. возросло (рис. ОР1.5 в [7]). Соответственно, при многолетнем приросте осадков из-за отрицательной обратной связи лесные экосистемы должны охлаждаться с большей скоростью, чем травяной покров. То есть, возможна авто-терморегуляция лесной растительности по мере роста температуры воздуха над оптимальной температурой фотосинтеза. Результаты показали, что, требуется дополнительное исследование для выяснения причин качественных различий в скоростях изменений по данным на метеостанциях (рис. 1В) и спутникового мониторинга (рис. 1Б).

Вызывает интерес причина нагрева поверхности экосистем архипелага Новая Земля и Полярного Урала (рис. 2), также как и множества нагреваемых локальных участков на Кольском полуострове. Это позволяет поставить вопрос: «Какие факторы определили этот нагрев? Природные или антропогенные?» В качестве возможных антропогенных факторов можно отметить загрязнение Новой Земли и Полярного Урала промыслами Западной Сибири, где сжигается большое количество попутного газа, что приводит к выбросу в атмосферу как оптически активных газов, так и сажи, осаждающейся на поверхности снежно-ледовых покровов. Нельзя исключать, также, воздействия на экосистемы Кольского полуострова со стороны гигантов цветной металлургии. Таким образом, и этот вопрос требует дополнительной проработки.

Дополнительным моментом, определившим высокую скорость нагрева поверхности острова Южный архипелага Новая Земля, могло быть то, что совсем недавно (по геологической шкале времени) остров был покрыт ледником. Ледник законсервировал низкую температуру земной поверхности, которая была на этой территории в ледниковый период. После освобождения острова от ледового покрова эта поверхность соприкоснулась с атмосферой более теплой по сравнению с атмосферой в период формирования ледника. В результате нарушилось термодинамическое равновесие, которое могло не восстановиться до настоящего времени. Возможно, и привело на архипелаге Новая Земля и острове Вайгач к более высокой скорости нагрева поверхности, по сравнению с территориями, где ледник деградировал раньше.

Анализ причин аномально высокой скорости нагрева локального участка (Г на рис. 2) показал, что это результат строительства нового горно-металлургического комплекса (рис. 3). Таким образом, по аномальной скорости нагрева почти мгновенно на огромной территории удалось выявить локальный участок уничтожающего антропогенного воздействия на лесные экосистемы. Ранее на основе спутникового мониторинга вегетационного индекса нами разработана методика оценки здоровья экосистем вокруг горно-металлургических предприятий [9–14]. Так, на примере рудника Валькумей (Чукотка) было изучено время восстановления тундровых экосистем после почти мгновенной ликвидации этого рудника и вывоза всего населения далеко за его пределы [13]. На примере горно-добывающего комплекса Terrafame (рис. 3Б) мы выявили объект, где строго датировано начало мощного техногенного воздействия на лесные экосистемы. Это позволяет, в дальнейшем, изучить в динамике реакцию лесных экосистем на воздействие комплекса Terrafame, используя более чувствительный термодинамический подход к анализу здоровья экосистем [15–17].

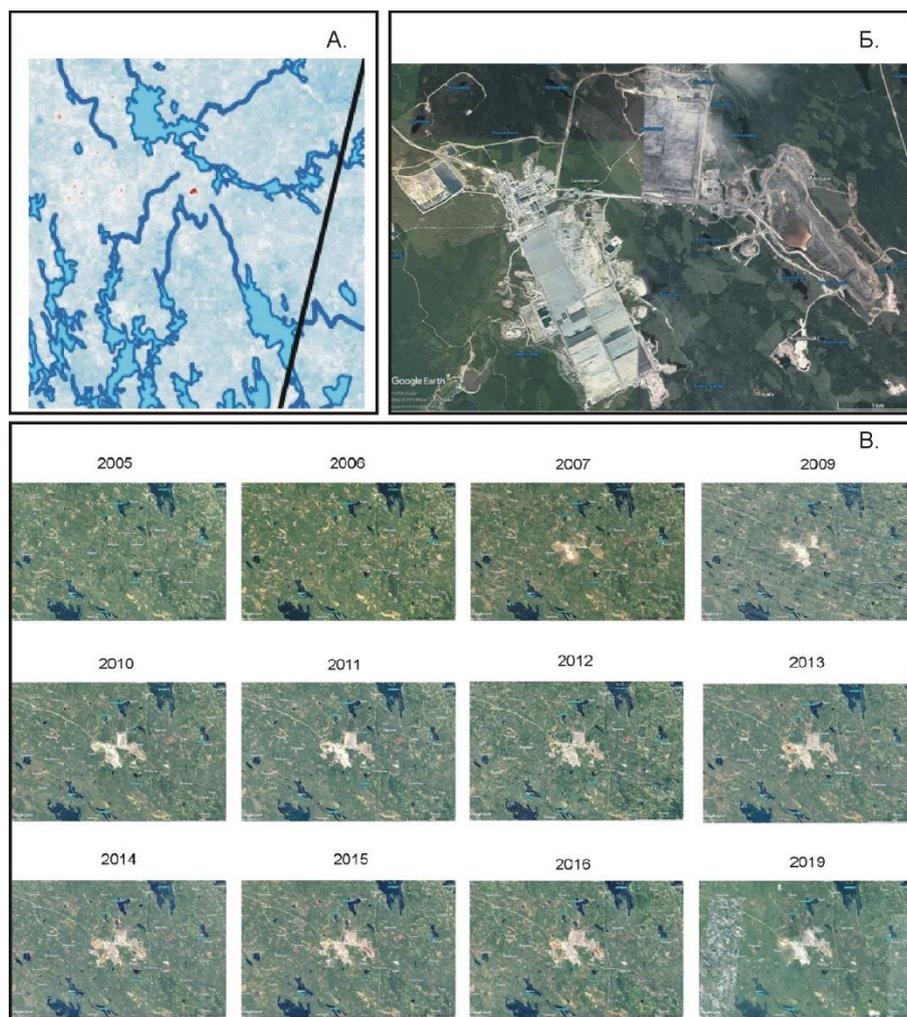


Рис. 3.

- А. Фрагмент карты скорости изменения температуры участка Г на рис. 2.
 Б. Спутниковый снимок современного вида горно-металлургического комплекса фирмы Terraframe, сформировавшего локальную аномальную область высокой скорости нагрева (см. на рис. 3А) (материал Google Earth).
 В. Многолетние изменения лесных экосистем при строительстве комплекса (материалы Google Earth), зарегистрированные спутниковыми съемками с 2005 г. по 2019 г.

Заключение

Настоящее исследование показало, что по данным дневных спутниковых тепловых съемок, проведенных за последние 17 лет, не отмечено общего нагрева поверхности экосистем всей территории Северной Европы, который мог бы трактоваться как результат глобального потепления климата. Более того, выявлены качественные различия по сравнению с данными климатологов. Возможно, что в Северной Европе повышение температуры воздуха, отмечавшееся начиная с первой четверти прошлого века, прекратилось в последние десятилетия. Поэтому, пока нет оснований для однозначных выводов и требуется продолжение наблюдений.

Таким образом, поставленная академиком К.Я. Кондратьевым проблема верификации результатов наблюдений за изменениями климата остается актуальной, что, тем более, определяет необходимость продолжения исследований в этом направлении.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 09-05-91360-ННИО_г «Организация и проведение Российско-Германского семинара: «Энергообеспеченность азональных экосистем» и научно-исследовательской темы НИЦЭБ РАН: «Разработка методов ранней диагностики и предупреждения угроз экологической безопасности экосистем Северо-Запада России».

ЛИТЕРАТУРА

1. Bornstein R.D. Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City // J. Applied Meteorology. 1968. V. 7. No. 4. P. 575–582.
2. Кондратьев К.Я. Неопределенность данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. 2004. №4. С 93–119.
3. Демирчян К.С., Кондратьев К.Я., Демирчян К.К. Глобальное потепление и «политика» его предотвращения // Биосфера. 2010. т. 2. №4. С. 488–502.
4. Daily per-pixel Land Surface Temperature and Emissivity Product MYD11A1v006, DOI:10.5067/MODIS/MYD11A1.006, <https://lpdaac.usgs.gov/products/myd11a1v006/>
5. Xiong, Xiaoxiong & Chiang, Kopu & Wu, Aisheng & Barnes, William & Guenther, Bruce & Salomonson, Vincent. Multiyear On-Orbit Calibration and Performance of Terra MODIS Thermal Emissive Bands. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 46. 2008. P. 1790–1803. 10.1109/TGRS.2008.916217.
6. Доклад Конференции Сторон о работе ее семнадцатой сессии, состоявшейся в Дурбане с 28 ноября по 11 декабря 2011 года / Рамочная Конвенция об изменении климата. Организация Объединенных Наций. 2012. 106 с. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/rus/09a01r.pdf>.
7. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Росгидромет. Москва. 2014. – 61 с. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>
8. Краснощеков К.В., Дергунов А.В., Пономарев Е.И. Оценка тепловых карт подстилающей поверхности на участках вырубок по данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. №2. С. 87–97.
9. Калабин Г.В., Евдокимова Г.А., Горный В.И. Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в процессе снижения воздействия комбината Североникель на окружающую среду // Горный журн. № 2. 2010. С. 74–77.
10. Калабин Г.В., Моисеенко Т.И., Горный В.И., Крицук С.Г., Соромотин А.В. Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению золоторудного месторождения «Олимпиада», обрабатываемого открытым способом // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 177–184.
11. Калабин Г.В., Горный В.И., Крицук С.Г. Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению Сорского медно-молибденового месторождения // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 1. С. 153–161.
12. Калабин Г.В., Горный В.И., Крицук С.Г. Оценка состояния окружающей среды территории Качканарского ГОКа по данным спутникового мониторинга // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 179–187.
13. Калабин Г.В., Горный В.И., Давидан Т.А., Крицук С.Г., Тронин А.А. Реакция тундровой экосистемы на снятие техногенной нагрузки со стороны рудника «Валькумей» // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 146–153.
14. Крицук С.Г., Горный В.И., Калабин Г.В., Латыпов И.Ш. Закономерности сезонных циклов вегетационного индекса экосистем в районе Сорского горно-металлургического комплекса // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 228–237.
15. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
16. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И. Ш., Храмцов В.Н. Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212.
17. Горный В.И., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 124–136.

Шилин Б.В.^{1,2*}, Груздев В.Н.^{1,2}

Материалы видеоспектральной съёмки

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук, Корпусная ул., д. 18, г. Санкт-Петербург, 197110, Россия

²Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Россия

*E-mail: bshilin@rambler.ru

Представлен большой экспериментальный материал по изучению спектральных характеристик различных фоноцелевых ансамблей с авианосителей и при полевых наблюдениях. Показана высокая эффективность метода при решении задач экологической безопасности.

Ключевые слова: видеоспектральная съёмка, спектральные характеристики, монохромные изображения, тяжёлые металлы.

Boris V. Shilin^{1,2*}, Victor N.Gruzdev^{1,2}

Video spectral materials

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, 18, Korpusnaya st., St. Petersburg, 197110, Russia

²Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky St. Petersburg, 197198, Russia

*E-mail: bshilin@rambler.ru

A large amount of experimental material is presented on the study of the spectral characteristics of various background targeting ensembles from aircraft carriers and during field observations. The high efficiency of the method is shown in solving problems of environmental safety.

Keywords: video spectral shooting, spectral characteristics, monochrome images, heavy metals.

Введение

По сравнению с известными методами дистанционного зондирования оптического диапазона видеоспектральная съёмка даёт принципиально качественный и огромный количественный информационные скачки. Это возможность получения данных с высоким пространственным и спектральным разрешением различных фоноцелевых ансамблей в виде десятков-первых сотен монохромных изображений и спектров уходящего излучения любой точки ансамбля (сцены, снимка).

Материалы съёмки и их анализ

1. Полевая съёмка

На рис. 1 и рис. 2 представлены некоторые результаты полевого эксперимента – два монохромных изображения на средних длинах волн 580 нм и 800 нм и серии кривых коэффициентов спектральной яркости объектов панорамного ансамбля. Съёмка выполнялась видеоспектрометром «Фрегат», установленном на вращающейся платформе [1]. На рисунке 1 видны два спортсмена, растительность (трава, шпалеры кустов), белая синтетическая крыша и зелёные стены теннисного корта а также эталоны для вычисления КСЯ (расположены между спортсменами – две белые и одна чёрная полосы).



Рис. 1. Два монохромных изображения для средних длин волн 578 и 800 нм. Видеоспектрометр «Фрегат»

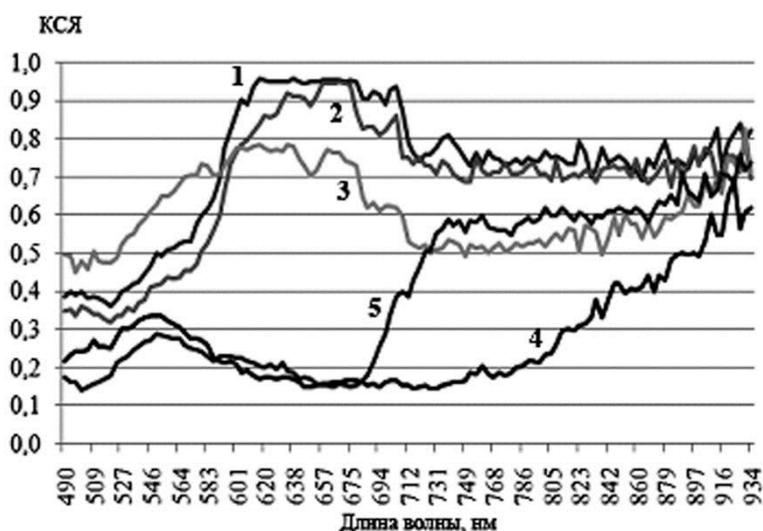


Рис. 2. Коэффициенты спектральной яркости элементов панорамы на рисунке 1:

1-грудь спортсмена в спокойном состоянии, 2-грудь спортсмена после интенсивной тренировки, 3-белая синтетическая стена теннисного корта, 4-зелёная стена, 5-растительность

Монохромные изображения представляют часть ансамбля с основными объектами, а их положение на шкале видимого и ближнего ИК диапазонов определяется значениями длин волн до «красного края» и сразу за его пределами на «ИК плато». Изображения наглядно иллюстрируют инверсию спектральных контрастов в интервале длин волн «красного края». Действительно, на первом изображении белая крыша корта и обнажённые тела спортсменов выглядят очень яркими, растительность и листва деревьев (вязы) – тёмными. На втором изображении крыша корта серая и с трудом выделяется на фоне растительности: трава газона очень яркая, освещённая листва – светлая. Интересно отметить контрасты зелёной стены корта (в центре изображений над эталонами между стволами деревьев): она хорошо видна на первом изображении и практически не выделяется на втором. Аналогично можно видеть, что чёрные или почти чёрные шорты спортсменов в видимом диапазоне не различаются; в ближнем ИК диапазоне у правого спортсмена они существенно более светлые из-за различий в вещественном составе.

Все отмеченные особенности монохромных изображений хорошо согласуются с общими закономерностями изменений кривых коэффициента спектральной яркости объектов ансамбля на рис. 2. Результаты эксперимента показывают, что для обнажённого тела человека в целом имеют место высокие значения КСЯ по всем длинам волн. Наименьшие значения КСЯ (0.4–0.6) наблюдаются в сине-зелёной зоне 500–540 нм, откуда начинается резкий подъём примерно до длины волны 600 нм (0.80–0.95). Эти

высокие значения сохраняются до длин волн 675–700 нм, затем происходит понижение КСЯ примерно до 0,8. Это величина с небольшими флуктуациями сохраняется до ближней ИК зоны 850–875 нм.

Если сравнить ход этих кривых с кривыми коэффициентов спектральной яркости других объектов (белой синтетической крышей корта, зелёной стеной корта, газона, листвы) можно отметить следующее. У белой крыши подъём кривой КСЯ начинается от длины волны 525 нм. Она выходит на максимум чуть меньше 0,8 в диапазоне 600–650 нм. Этот максимум заметно уступает максимуму для тела человека. Спад кривой КСЯ происходит в интервале 650–725 нм до значения 0,5. Фактически кривые КСЯ для тела и крыши различаются во всём регистрируемом диапазоне длин волн с инверсией контрастов в ближнем ИК диапазоне (рис. 2).

Характерная для растительности кривая коэффициента спектральной яркости газона (нитрофильное высокотравье) указывает на существенные различия с кривой КСЯ человека в видимом диапазоне на длинах волн 500–675 нм, далее за счёт резкого возрастания – «красный край» растительности – до 750 нм различия почти нивелируются и в ближнем ИК диапазоне оба «живых организма» имеют близкие высокие значения КСЯ (0,8 или чуть меньше).

Сравнение кривых КСЯ различных частей тела спортсменов до и после интенсивной тренировки выявило небольшие различия только для области грудной клетки для видимой зоны – КСЯ понижается после тренировки. Очевидно, это связано с увлажнением кожи за счёт потоотделения или с другими физиологическими механизмами.

Сравнивая кривые спектральной яркости «живых организмов» (кривые 1, 2 и 5) можно заметить их существенное сходство – имеются участки резкого подъёма КСЯ и следующие за ними участки «высоких плато». Но для человека подъём приходится на диапазон 560–600 нм, а для растительности – на 675–725 нм; для человека плато связано с красной зоной, а для растительности – с ближней инфракрасной. Известно, что растительность отражает ненужный для фотосинтеза ближний ИК диапазон; можно предположить, что и человек отражает ненужную и, возможно, даже вредную часть видимого диапазона.

На рисунках 3–7 представлены результаты обнаружения стресса растений при кратковременном разовом воздействии тяжёлых металлов по изменению спектральных характеристик до появления у растений видимых морфологических изменений и возможностей обнаружения и картографирования этих изменений.

Экспериментальные исследования [2, 3] включали дозированное загрязнение объектов – трав и кустарников хлористым натрием (засоление) и солями тяжёлых металлов (Cu, Ni, Cd, Pb) по возможности с начала вегетационного сезона с последующими периодическими видеоспектральными наблюдениями соответствующих фоноцелевых ситуаций на тестовых участках с целью выявления «спектральных аномалий», времени их появления и возможного исчезновения. Отбирались пробы листьев древесных и наземных частей растений для определения содержания тяжёлых металлов. Анализ этих материалов показал:

- 1) Влияние на растения Na и тяжёлых металлов Ni, Cu, Cd, Pb в концентрации 1–3 ПДК (предельно допустимые концентрации) на ранних стадиях воздействия существенно сказывается на изменениях коэффициентов спектральной яркости. Это может служить ранним и важнейшим индикатором стресса растений до появления у них морфологических изменений. За короткий срок, через несколько дней, спектральная аномалия возникает у травянистой растительности; через примерно десять дней – у кустарников. Существует аномалия до двух месяцев.
- 2) Полевая видеоспектральная съёмка высокого пространственного и спектрального разрешения является быстрым эффективным методом обнаружения и картографирования вышеуказанных закономерностей благодаря возможности получения в реальном масштабе времени спектральной информации (серий монохромных изображений и спектров уходящего излучения – рисунки 1–7) больших площадей с фоновыми и тестовыми объектами. Значения «спектральных аномалий» и длительность их существования позволяют сделать вывод о возможности их регистрации и мониторинга авиационными видеоспектральными системами.
- 3) Наибольшее значение для индикации стресса тяжёлых металлов на ранних стадиях воздействия имеет ближняя ИК зона (700–900) нм.
- 4) Для диагностических целей следует использовать весь диапазон спектральной чувствительности (400–900) нм, а не ограничиваться, как это было принято до настоящего времени, выбором «оптимальных» спектральных интервалов. Индикационная роль ближней ИК зоны (1,0–2,5) мкм невелика.

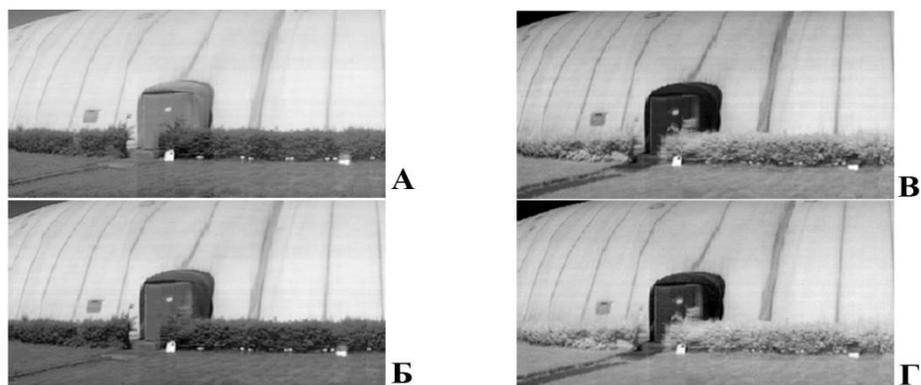


Рис. 3 А, Б, В, Г. Четыре монохромных изображения тестовой площадки с газоном и кустами барбарисом Тунберга для длин волн А – 530 нм, Б – 586 нм, В – 734 нм и Г – 737 нм

На рисунке 3 видны яркие миры, шпалера кустов барбариса, светлая стена корта с железной дверью и идущая от неё гравийная дорожка. Сравнение двух пар изображений хорошо иллюстрирует известную инверсия спектральных контрастов «растительность – почвы или горные породы (гравийная дорожка)»: до красного края – почвы светлее или близки по яркости к растительности, за красным краем, напротив, – светлее, благодаря её высокой отражательной способности в ближнем ИК диапазоне (700–850) нм, выглядит растительность. На монохромных изображениях каналов 530 и 587 нм и светлым выглядит бетонная площадка – порог у двери, яркость гравийной дорожки близка к яркости травы и выше, чем у кустов барбариса. На изображениях каналов 734 нм и 752 нм дорожка выглядит темной, светлыми или очень светлыми стали газон и кусты барбариса.

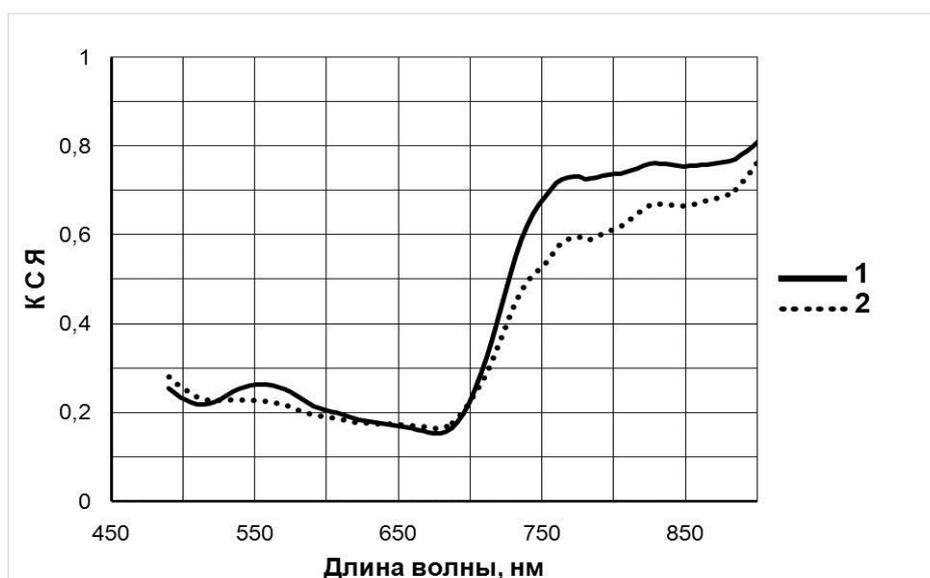


Рис. 4. КСЯ барбариса Тунберга. Измерения 29 июня 2016 г.

1 – контрольная площадка, 2 – площадка, загрязнённая сульфатом меди (через полтора месяца после полива фиксируется отрицательная спектральная аномалия в ближнем ИК диапазоне)

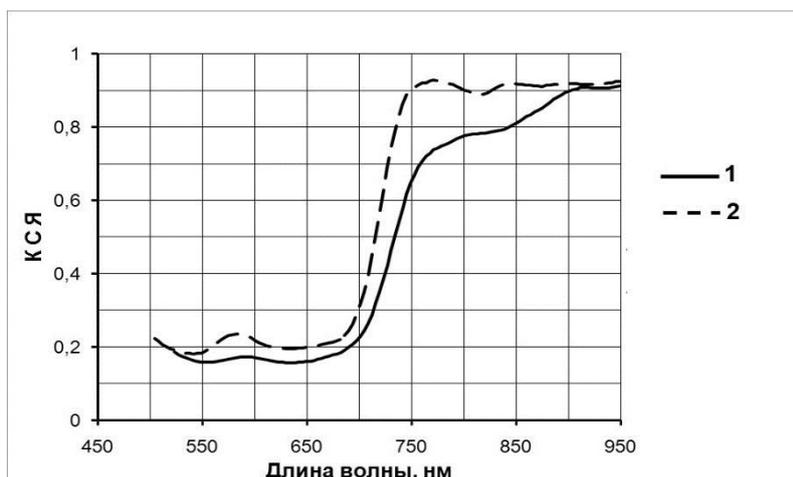


Рис. 5. КСЯ сирени венгерской. Измерения 19 сентября 2016 г.
1 – контрольная площадка, 2 – площадка, загрязнённая сульфатом кадмия (после полива 17 августа фиксируется положительная спектральная аномалия в ближнем ИК диапазоне)

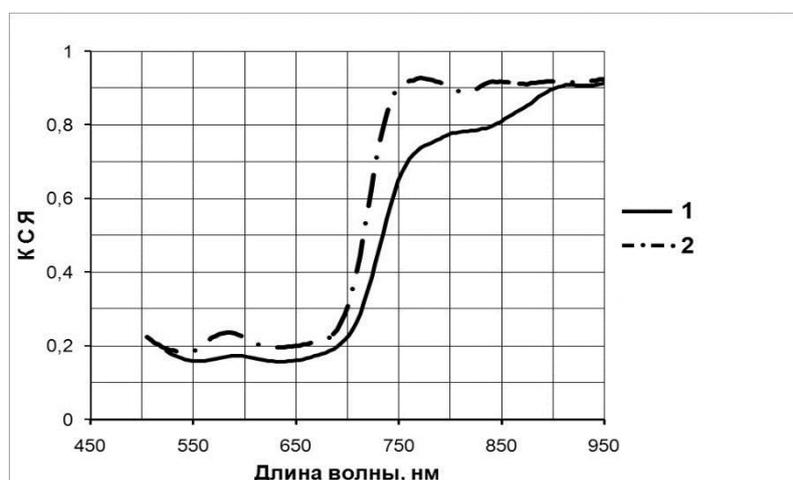


Рис. 6. КСЯ хосты ланцетолистой. Измерения 26 июля 2016 г.
1 – контрольная площадка, 2 – площадка, загрязнённая сульфатом кадмия (полив 15 июля). Фиксируется положительная спектральная аномалия в ближнем ИК диапазоне

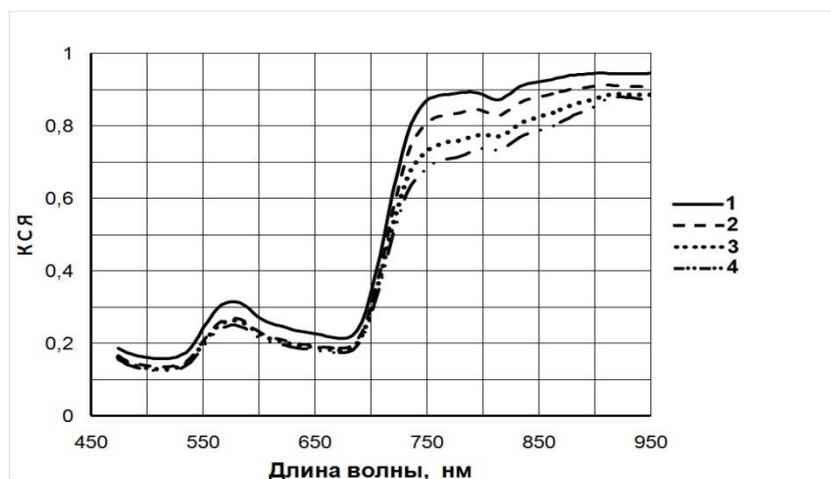


Рис. 7. КСЯ кизильника. Измерения 31 августа 2016 г.
1 – контрольная площадка, 2, 3, 4 – площадки, загрязненные сульфатом кадмия (1, 2, 3 ПДК, поливы 15 июня и 12 июля). Для всех уровней загрязнения фиксируется отрицательная спектральная аномалия в ближнем ИК диапазоне

2. Видеоспектральная аэросъёмка

В качестве примера материалов аэросъёмки на рис. 8 приведены 20 из более чем сотни возможных видеоспектральных монохромных изображений участка летнего сельскохозяйственного ландшафта. Ширина каждого диапазона 7 нм, изображения «расположены» равномерно с шагом 20 нм (центры каналов указаны на рис. 8). Простое визуальное их сравнение даёт возможность проследить очевидные различия спектральных контрастов ландшафта. Наиболее заметны изменения для таких его компонентов как растительность – естественная и культурная (огороды), для которой интенсивность излучения увеличивается, начиная с длины волны 700–720 нм. То же самое наблюдается для обнажённых почв (пашня) и горных пород (пляжные пески) и некоторых антропогенных объектов (например, грунтовых дорог). Наименьшие изменения отмечаются у водной поверхности. Отметим, что постоянно положительные контрасты суша-вода увеличиваются с возрастанием длины волны примерно до 800 нм и потом слегка уменьшаются. Хорошо видна инверсия контрастов некоторых объектов с фоном. Это обнажённые участки пашни – выравнивание контрастов отмечается в канале 720 нм; до канала 720 нм эти объекты светлые, начиная с канала 740 нм – тёмные. Песчаные пляжи, песчаные дороги и тропинки выглядят очень светлыми до аэроснимка канала 720 нм. Далее контраст с фоном выравнивается, и объекты выделяются как слабо тёмные, причём дороги имеют несколько больший контраст и дешифрируются более уверенно. Можно проследить изменение контрастов и других объектов.

Результаты вычисления спектров уходящего излучения для некоторых наиболее характерных объектов фоноцелевой обстановки (рис. 8) представлены на рис. 9.

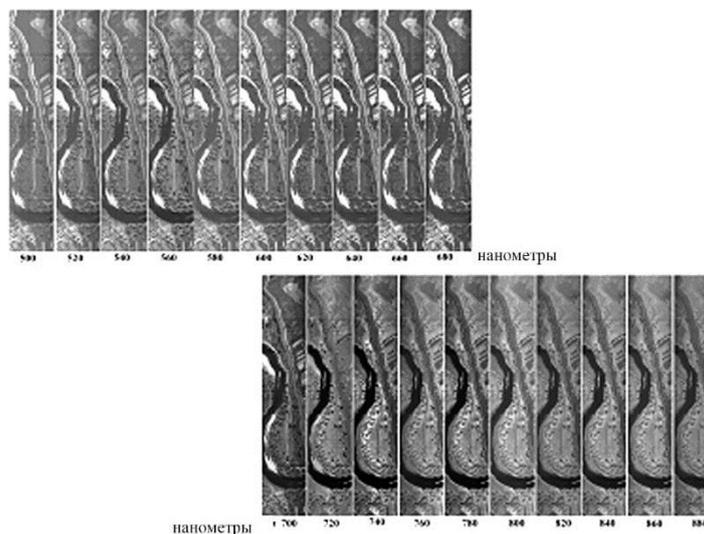


Рис. 8. Серия монохромных аэроснимков. Видеоспектрометр «Фрегат»

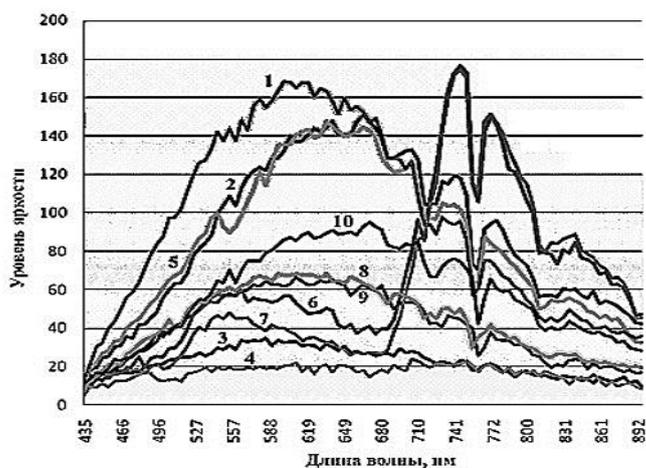


Рис. 9. Спектры отражения некоторых элементов ландшафта на рисунке 8.
1-ж/д полотно, 2-грунтовая дорога, 3-река, 4-пруд, 5-пляж, 6-крона дерева, 7-луг, 8-скат крыши темный, 9- скат крыши светлый, 10-пашня

Наименьшая интенсивность отражённого излучения по всему спектру наблюдается у водной поверхности – река, пруд (старица). Несколько большей интенсивностью с монотонным возрастанием примерно до 600 нм и плавным падением характеризуются такие объекты как крыша дома и участки мелководья (просвечивают у острова). Ещё большую интенсивность уходящего излучения в диапазоне 540–890 нм имеют участки пашни, они значительно уступают по интенсивности только песчаному пляжу и песчаной дороге. Хорошо известную для растительного покрова форму спектра с резким возрастанием от 690 нм и чётким «ИК-плато» дают луг, кроны деревьев и кустарник. Эти объекты различаются между собой по интенсивности в интервале длин волн 500–620 нм и в ближнем ИК диапазоне.

Заключение

Проведённый анализ монохромных видеоспектральных изображений и спектров позволяет сделать вывод, что видеоспектральная съёмка решает обратную геофизическую задачу дистанционного зондирования, так как спектры излучения большинства объектов любых фоноцелевых ситуаций существенно различаются. Однако следует отметить, что некоторые объекты, уверенно дешифрирующиеся на аэроснимках, имеют одинаковые спектры излучения. В то же время встречаются случаи, когда объекты, плохо разделяющиеся или совсем не разделяющиеся на монохромных аэроснимках, имеют существенные различия в спектрах. Это, например, деревья у кромки берега и тот же вид деревьев на лугу на рис. 8 и 9 – они различаются в видимой части спектра. Различия, по-видимому, обусловлены изменениями влагообеспеченности у кромки берега и вдали от реки, т.е. условиями жизнедеятельности. Аналогичным примером может служить водная поверхность реки и пруда (старицы), где спектральные различия с наибольшей вероятностью связаны с изменениями характеристик воды (содержание взвешенного вещества, водной растительности).

Видеоспектральная съёмка в различных вариантах – космическом, авиационном полевом, лабораторном – за рубежом развивается быстрыми темпами благодаря наличию большого перечня видеоспектрометров различного назначения. Большое количество публикаций иллюстрируют соответствующие достижения. В нашей стране видеоспектральная съёмка находится на стадии становления из-за отсутствия серийных приборов. Проводится ограниченный объём исследований и опытно-методических работ. При небольших инвестициях в технику и методику можно ожидать быстрого развития метода.

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ, проект 16-29-09449.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.А., Шилин Б.В., Шилин И.Б. Опыт полевых видеоспектральных исследований. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. №4. С. 89–94.
2. Бакина Л.Г., Груздев В.Н., Дроздова И.В., Шилин Б.В. Дистанционное обнаружение стресса растительности на ранних стадиях воздействия тяжёлыми металлами // Региональная экология. 2016. № 1 (43). С. 81–89.
3. Груздев В.Н., Дроздова И.В., Кузнецов А.Ю., Шилин Б.В. Решение задач экологической безопасности видеоспектральным методом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. № 1. С. 8–17.

Янковский В.А. *, Мануйлова Р.О.

**Модель кинетики возбужденных продуктов фотолиза озона и
молекулярного кислорода солнечным излучением в диапазоне длин
волн 100 – 900 нм в мезосфере и нижней термосфере**

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9
*E-mail: vyankovsky@gmail.com

В последние десятилетия было показано, что эмиссии возбужденного атома кислорода $O(^1D)$ и молекулярного кислорода в электронно-колебательно-возбужденных состояниях $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$ и $O_2(a^1\Delta_g, v)$ связаны единым фотохимическим механизмом в мезосфере и нижней термосфере (МНТ). Настоящая статья состоит из двух частей: обзор исследований, связанных с разработкой модели кинетики возбужденных продуктов фотодиссоциации озона и молекулярного кислорода в дневной МНТ, и новые результаты, полученные при решении различных прикладных задач с использованием данной модели. В частности, дано подробное описание механизма формирования возбужденных кислородных компонентов в дневной МНТ, представлено возможное использование измерений интенсивностей дневных эмиссий кислорода со спутников для получения высотных зависимостей концентраций $O(^3P)$, O_3 и CO_2 путем решения обратных фотохимических задач, когда эмиссии из электронно-колебательно возбужденных состояний молекулы O_2 используются в качестве трассеров.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мезосфера и нижняя термосфера, эмиссии атомного и молекулярного кислорода, озон, атомарный кислород.

Yankovsky V.A. *, Manuilova R.O.

**Kinetics model of the excited products of the ozone and molecular
photolysis of by solar radiation in the wavelength range of 100 - 900 nm in
the mesosphere and lower thermosphere**

Saint Petersburg State University
7/9 Universitetskaya nab., Saint Petersburg, 199034, Russia
* E-mail: vyankovsky@gmail.com

In recent decades, it was shown that the emissions of the excited oxygen atom $O(^1D)$ and molecular oxygen in the electronically-vibrationally excited states $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$ and $O_2(a^1\Delta_g, v)$ are connected by a single photochemical mechanism in the mesosphere and lower thermosphere (MLT). This study consists of two parts: a review of studies related to the development of the model of kinetics of the excited products of photodissociation of ozone and molecular oxygen in the daily MLT, and new results obtained in solving various practical problems using this model. In particular, the article gives a detailed description of the mechanism of formation of excited oxygen components in daytime MLTs, presents the possible use of measurements of the intensities of the oxygen emissions from satellites to obtain altitude dependences of $O(^3P)$, O_3 and CO_2 concentrations by solving inverse photochemical problems when emissions from the electronically-vibrationally excited states of the O_2 molecule are used as tracers.

Keywords: remote sensing, mesosphere and low thermosphere, atomic and molecular oxygen emissions, ozone, atomic oxygen.

Введение

Эмиссии атомарного и молекулярного кислорода наблюдаются в атмосфере с середины XIX века. В последние десятилетия было показано, что эмиссии возбужденного атома кислорода $O(^1D)$ и молекулярного кислорода в электронно-колебательно-возбужденных состояниях $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$ и $O_2(a^1\Delta_g, v)$ связаны единым фотохимическим механизмом в мезосфере и нижней термосфере (МНТ). Настоящая статья состоит из двух частей: обзор исследований, связанных с разработкой модели кинетики возбужденных продуктов фотодиссоциации озона и молекулярного кислорода в дневной МНТ, и новые результаты, полученные при решении различных практических задач с использованием данной модели. В

частности, в статье дано подробное описание механизма формирования возбужденных кислородных компонентов в дневной МНТ. В работе также демонстрируются новые подходы, используемые нами для создания современной базы данных коэффициентов скоростей и квантовых выходов продуктов реакций с участием $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$, $O_2(a^1\Delta_g, v)$, $O_2(X^3\Sigma_g^-, v)$ и новые оценки радиационных времен жизни $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0 - 10)$, необходимые для решения обратной задачи в нижней термосфере. В дополнение к обзору и новым результатам, представлено возможное использование измерений интенсивностей дневных эмиссий кислорода со спутников для получения высотных зависимостей концентраций $O(^3P)$, O_3 и CO_2 путем решения обратных фотохимических задач, когда эмиссии из электронно-колебательно возбужденных состояний молекулы O_2 используются в качестве трассеров.

Современная модель кинетики продуктов фотолиза O_2 и O_3 в МНТ УМ2011

Прежде всего для моделирования высотных профилей эмиссий возбужденных компонент кислорода необходимо понять механизмы их образования и тушения. В дневной мезосфере и нижней термосфере (МНТ) основные источники возбуждения электронно-колебательных уровней молекулы кислорода можно разделить на: (i) фотопроцессы, а именно фотолиз озона и кислорода при поглощении солнечной радиации озоном в полосах Хартли, Хаггинса, Шапкюи и Вульфа и кислородом в континууме Шумана – Рунге и линии Н Лаймана-альфа; (ii) процессы резонансного поглощения солнечного излучения. Резонансное поглощение солнечного излучения в полосах с центрами 0,762, 0,688, 0,629 и 1,27 мкм приводит к прямому возбуждению $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0, 1, 2)$ и $O_2(a^1\Delta_g, v = 0)$, соответственно. Скорости этих процессов традиционно обозначаются g_{α} , g_{β} , g_{γ} и $g_{IR\alpha}$. Основные детали этого механизма стали ясны в конце 1970-х годов [1]. Выше 90 км к образованию возбужденных атомов кислорода $O(^1D)$ в основном приводит фотолиз молекул кислорода вследствие поглощения солнечного излучения в континууме Шумана – Рунге, между тем в диапазоне высот 70–90 км $O(^1D)$ образуется при фотолизе кислорода из-за поглощения им излучения в линии Н Луман-альфа. Ниже 100 км источником образования $O(^1D)$ также является фотолиз озона в полосе Хартли [2]. По меньшей мере, 90% поглощенной солнечной энергии идет на образование возбужденного атома $O(^1D)$ при фотолизе O_2 и O_3 . Далее энергия $O(^1D)$ (порог возбуждения 1.967 эВ) расходуется на возбуждение уровней $O_2(b^1\Sigma_g^+, v < 2)$.

На рис. 1 представлен механизм переноса энергии между возбужденными кислородными компонентами в атмосфере [1, 2]. Как видно из рис. 1, не только передача энергии от уровней $O_2(b^1\Sigma_g^+, v < 2)$ является источником возбуждения $O_2(a^1\Delta_g, v \leq 3)$. В мезосфере есть еще один важный источник возбуждения для уровней $O_2(a^1\Delta_g, v \leq 5)$, а именно синглетный канал фотолиза озона в полосе Хартли. Несмотря на то, что многие исследователи все еще предполагают, что в этом случае образуется только уровень $O_2(a^1\Delta_g, v = 0)$, многочисленные лабораторные эксперименты с 1980 года по настоящее время показывают одновременное возбуждение уровней $O_2(a^1\Delta_g, v)$ с колебательными квантовыми числами v от 0 до 5 [1]. Окончательно населенность уровня $O_2(a^1\Delta_g, v = 0)$ формируется в результате переноса энергии с более высоких колебательных состояний $O_2(a^1\Delta_g, v = 1 - 5)$. Кроме того, возможны эмиссионные (оптические) переходы с каждого из уровней $O_2(a^1\Delta_g, v)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$ на более низкие уровни $O_2(X^3\Sigma_g^-, v)$ (рис. 1). Переходы $O_2(b^1\Sigma_g^+, v \rightarrow X^3\Sigma_g^-, v')$ называются системой атмосферных полос, а переходы $O_2(a^1\Delta_g, v \rightarrow X^3\Sigma_g^-, v')$ образуют систему ИК атмосферных полос. В этих системах преобладают переходы ($v' = 0 \rightarrow v' = 0$), соответствующие длинам волн 762 нм и 1.27 мкм соответственно. Однако переходы с других колебательных уровней также наблюдаются [1, 3]. Высотные профили объемных скоростей эмиссии (VER) в этих переходах позволяют определить населенности возбужденных уровней молекул $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$ и $O_2(a^1\Delta_g, v)$. Это, в свою очередь, позволяет отслеживать все стадии переноса энергии с верхних возбужденных уровней на основное состояние молекул кислорода. Для моделирования механизма образования возбужденных молекул и атомов кислорода, показанного на рис. 1, нам нужно знать коэффициенты Эйнштейна для эмиссионных переходов и иметь базу данных коэффициентов скоростей реакций переноса энергии между электронно-колебательными уровнями молекул кислорода и скоростей деактивации возбужденных компонентов кислорода при столкновениях с основными компонентами атмосферы, а именно O_2 , N_2 , O_3 , $O(^3P)$, CO_2 [3]. Роль других малых компонентов атмосферы в столкновительных процессах пренебрежимо мала [4].

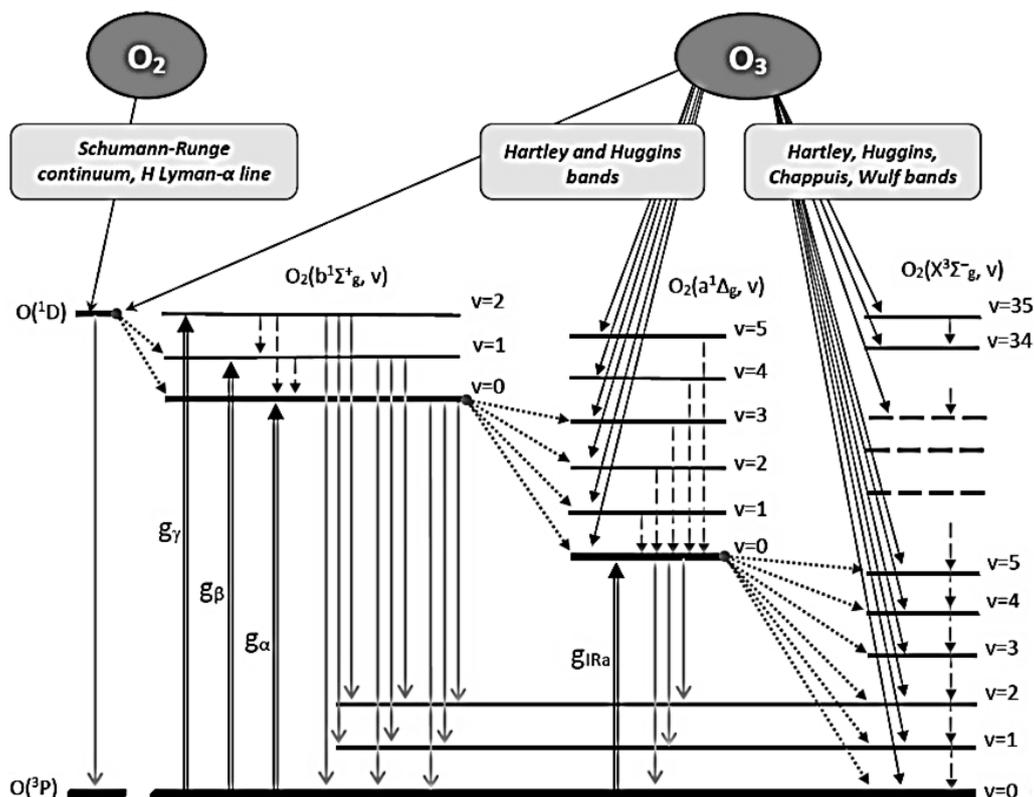


Рис. 1. Схема электронно-колебательной кинетики продуктов фотолиза O_2 и O_3 в области МНТ (модель YМ2011, версия 2019) с учетом 44 возбужденных уровней молекулы кислорода (три уровня $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0, 1, 2)$, шесть уровней $O_2(a^1\Delta_g, v = 0 - 5)$, 35 уровней $O_2(X^3\Sigma_g^-, v = 1 - 35)$, а также возбужденный уровень атома кислорода $O(^1D)$). Сплошные тонкие наклонные линии со стрелками обозначают процессы фотолиза O_2 and O_3 . Двойные вертикальные линии со стрелками обозначают процессы резонансного поглощения солнечного излучения в полосах 762 нм (g_α), 688 нм (g_β), 629 нм (g_γ) и в полосах 1,27 мкм (g_{IRa}). Короткие пунктирные наклонные линии со стрелками показывают передачу энергии от $O(^1D)$ к $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0, 1)$, от $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0)$ к $O_2(a^1\Delta_g, v = 0 - 3)$ и от $O_2(a^1\Delta_g, v = 0)$ к $O_2(X^3\Sigma_g^-, v = 0 - 5)$ при столкновительной деактивации. Длинные штриховые вертикальные линии со стрелками обозначают столкновительные V-V переходы. Сплошные вертикальные линии со стрелками вниз указывают на процессы излучения с электронно-колебательных уровней молекулы O_2 и возбужденного атома $O(^1D)$

Фотодиссоциация O_3 и ее продукты

Как уже упоминалось, существует два канала фотодиссоциации O_3 : (i) синглетный канал $O_3 + h\nu$ ($\lambda = 200 - 320$ нм) $\rightarrow O_2(a^1\Delta_g, v = 0 - 5) + O(^1D)$ в полосе Хартли; (ii) триплетный канал $O_3 + h\nu$ ($\lambda = 200 - 900$ нм) $\rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v = 0-35) + O(^3P)$ в полосах Хартли, Хаггинса, Шаппюи и Вульфа.

Здесь мы сосредоточимся на синглетном канале, поскольку зависимость квантовых выходов $O_2(X^3\Sigma_g^-, v = 0 - 35)$ в триплетном канале от длины волны уже была изучена Сванбергом с соавторами [1]. Экспериментальные исследования квантовых выходов образования $O_2(a^1\Delta_g, v = 0 - 5)$ в синглетном канале фотолиза O_3 для фиксированных длин волн также проводились неоднократно [1], однако статистическая обработка результатов не проводилась. Дискретные данные не удобны для аналитических исследований, так как эти данные требуют дальнейшей интерполяции. Поэтому здесь мы кратко рассмотрим аналитическое описание квантовых выходов $O_2(a^1\Delta_g, v)$ в синглетном канале фотолиза озона в зависимости от длины волны. Более подробное описание этого аналитического подхода можно найти в [1]. Баланс энергии реакции (i) можно записать как:

$$\Delta E = E - E_{\text{Diss}O_3} - E_{O(^1D)} - E_{O_2(a, v=0)}, \quad (1)$$

где E - энергия фотона, E_{DissO_3} - энергия диссоциации озона (1,05 эВ), $E_{\text{O}(^1\text{D})}$ - энергия возбуждения $\text{O}(^1\text{D})$ относительно основного состояния (1,967 эВ), а $E_{\text{O}_2(a, v=0)}$ - энергия возбуждения $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v = 0)$: относительно основного состояния (0,977 эВ).

Далее мы вводим параметр x , определяющий долю молекул $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v)$ которые имеют энергию выше порога возбуждения уровня $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v = 0)$:

$$x = \exp\left(\frac{\Delta E}{-E_{\text{O}_2(a, v=0)}}\right) \quad (2)$$

Тогда квантовый выход $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v = 0)$ определяется долей энергии, которая идет на возбуждение этого уровня, в зависимости от длины волны и может быть рассчитан по формулам:

$$F_{a,0}(x) = C_0 x \text{ для } v = 0 \quad (3)$$

$$F_{a,v}(x) = C_v \cdot x \cdot \left(1 - x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{2^2} - \dots - \frac{x^v}{2^{v-1}}\right) \text{ for } v \geq 1 \quad (4)$$

где C_v – нормировочные коэффициенты, которые были рассчитаны при условии, что сумма квантовых выходов всех колебательно возбужденных молекул $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v)$ равна 1. Каждый нормировочный коэффициент рассчитывался при пороговом значении энергии, начиная с которого молекула кислорода со следующим колебательным уровнем образуется во время фотолиза (верхняя шкала на рис. 2).

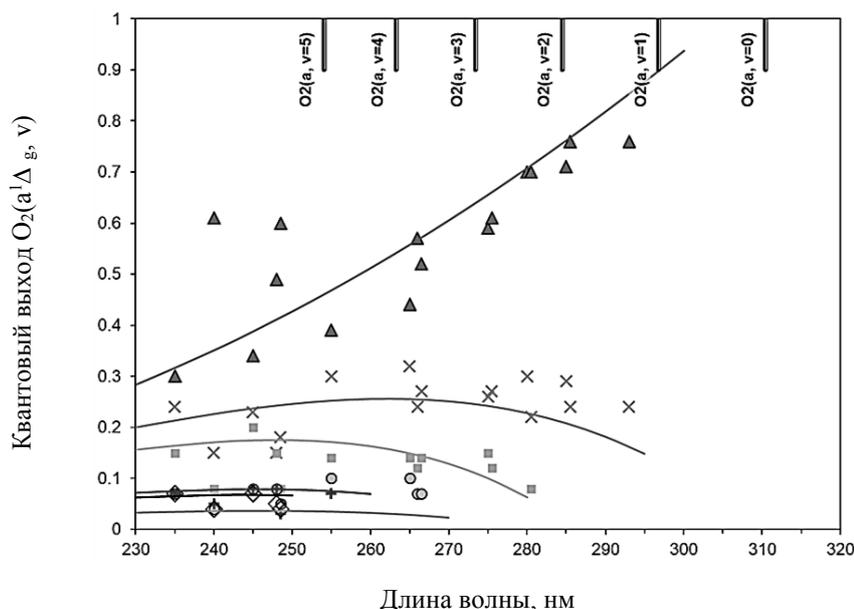
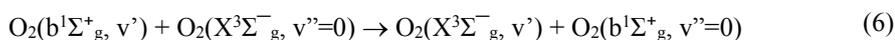
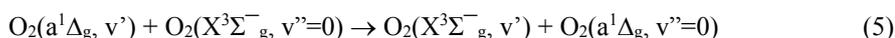


Рис. 2. Квантовые выходы образования $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v = 0-5)$ в результате фотолиза O_3 в полосе Хартли, $F_{a,v}$. Экспериментальные данные: треугольники ($v = 0$), кресты ($v = 1$), квадраты ($v = 2$), круги ($v = 3$), плюсы ($v = 4$) и ромбы ($v = 5$). Расчеты значений $F_{a,v}$ по уравнениям (3) и (4) для разных v представлены сплошными линиями.

На рис. 2 представлено сравнение всех известных в настоящее время экспериментальных значений $F_{a,v}$ (символы) с расчетами по уравнениям (3) и (4) (сплошные линии). Из рис. 2 хорошо видно, что на пике сечения поглощения полосы Хартли (длина волны ~ 254 нм) одновременно образуются молекулы в шести состояниях $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v = 0-5)$, более того, квантовый выход образования $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v = 0)$ не превышает 45%.

Перенос энергии в столкновительных реакциях

Таким образом, в результате фотолиза O_2 и O_3 образуются как возбужденный атом $O(^1D)$ так и молекулы кислорода в состояниях $O_2(a^1\Delta_g, v = 0 - 5)$. Кроме этого, молекулы $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0-2)$ образуются в результате резонансного поглощения солнечного излучения. Далее, энергия этих возбужденных уровней передается нижним возбужденным уровням молекулы кислорода в результате процессов излучения и столкновения (см. рис. 1). С 1998 года в лаборатории молекулярной физики (MPL) Института космических исследований (США) была начата серия экспериментов по измерению коэффициентов скорости реакций с участием электронно-колебательно-возбужденных молекул кислорода в двух синглетных состояниях, $O_2(b^1\Sigma_g^+, v \geq 1)$ и $O_2(a^1\Delta_g, v \geq 1)$, при столкновениях с атомарным и молекулярным кислородом, а также с азотом (см. ссылки в [5, 3]). В результате экспериментов было установлено, что коэффициенты скорости этих реакций имеют аномально высокие значения, близкие к скоростям газокинетических столкновений. Это было своего рода неожиданностью, поскольку величины коэффициентов скоростей реакций для синглетных уровней молекулы кислорода без колебательного возбуждения были низкими, порядка $10^{-15} - 10^{-18} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$. Сотрудники лаборатории MPL смогли объяснить резкое ускорение реакций при $v \geq 1$ тем, что эти реакции проходят через канал электронно-колебательного обмена, а именно:



Особенность этих реакций в том, что квант электронного возбуждения передается партнеру по столкновению, а квант колебательного возбуждения «заморожен», и значение v остается постоянным. Эти реакции имеют энергетический дефект в диапазоне $0 - 250 \text{ см}^{-1}$. Типичные коэффициенты скорости этих реакций для $v = 1, 2, 3$ имеют значения $(0,5 - 5,0) \times 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, то есть их скорости лишь в несколько раз ниже скорости газокинетических столкновений (см. рис. 3).

Особый интерес представляют столкновительные реакции электронно-колебательно-возбужденных молекул кислорода с атомарным кислородом. На сегодняшний день продукты этих реакций неизвестны, а величины их коэффициентов скоростей, лежат в диапазоне значений порядка $10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ для состояния $O_2(b^1\Sigma_g^+, v=2)$ до $10^{-13} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ для $O_2(b^1\Sigma_g^+, v=0)$ [3]. Такой разброс значений можно объяснить, если предположить, что только самые быстрые из этих реакций являются квазирезонансными.

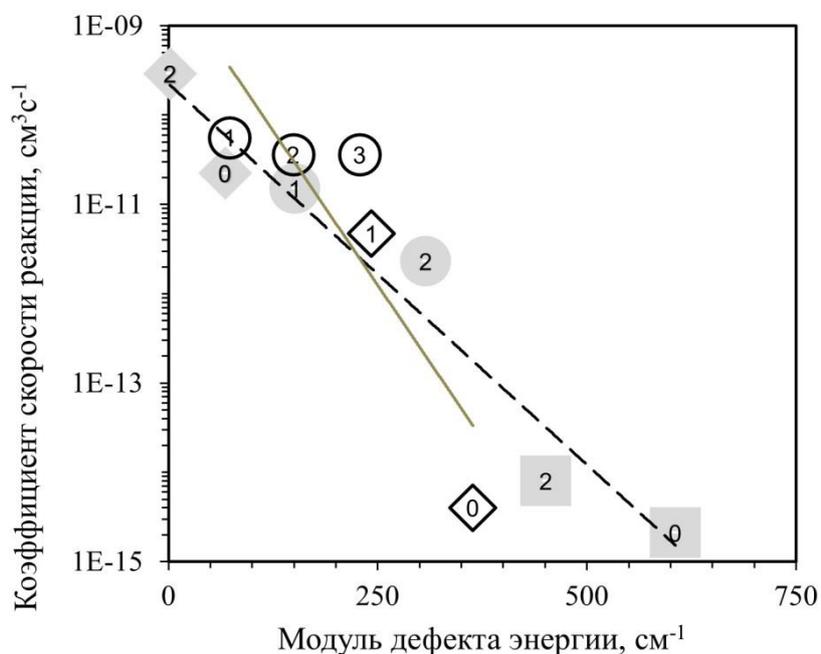


Рис. 3. Коэффициенты скоростей реакций $O_2(b^1\Sigma_g^+, v) + O_2 \rightarrow$ продукты (заштрихованные круги), $O_2(b^1\Sigma_g^+, v) + N_2 \rightarrow$ продукты (заштрихованные квадраты), $O_2(b^1\Sigma_g^+, v) + O_3 \rightarrow$ продукты (заштрихованные ромбы), $O_2(a^1\Delta_g, v) + O_2 \rightarrow$ продукты (круги), $O_2(a^1\Delta_g, v) + O_3 \rightarrow$ продукты (ромбы) [2]. Числа указывают значения колебательного квантового числа v

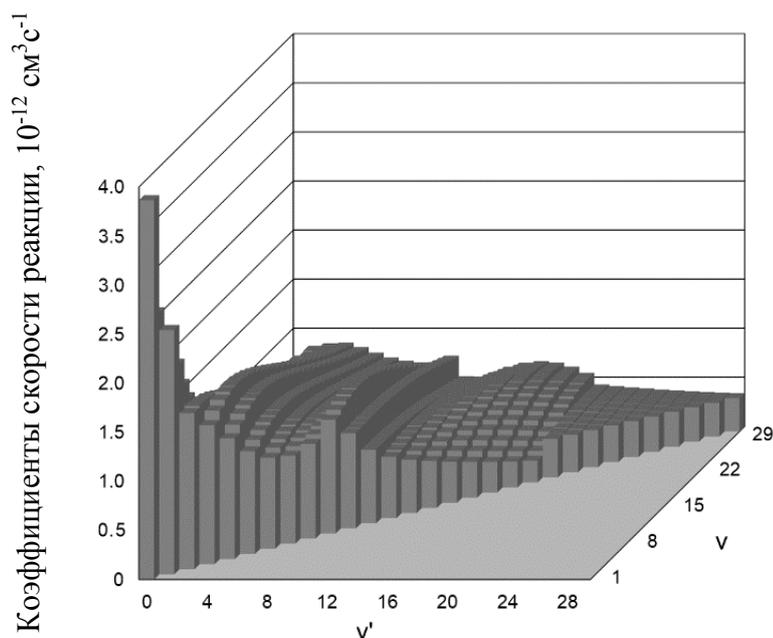
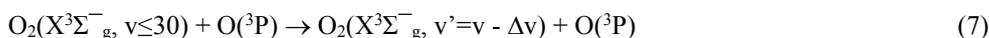


Рис. 4. Коэффициенты скорости реакции $O_2(X^3\Sigma_g^-, v \leq 30) + O(^3P) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v' = v - \Delta v) + O(^3P)$ в зависимости от v и v' [6]

В настоящее время теоретические расчеты значений коэффициентов скоростей реакции в зависимости от значений колебательного квантового числа были проведены только для одной реакции с участием атомарного кислорода:



Авторы работы [6] рассчитали значения коэффициентов скорости реакции (7) для $\Delta v = 1 - 30$ (см. рис. 4). Эта реакция оказалась ключевой для моделирования населенности уровня $O_2(X^3\Sigma_g^-, v' = 1)$ в области МНТ [1]. Отличительной особенностью этого механизма является то, что для расчетов населенности нижнего колебательного уровня $O_2(X^3\Sigma_g^-, v' = 1)$, необходимо учитывать каскадные переходы со всех вышележащих уровней $v' = 2 - 30$.

Используя экспериментальные исследования и теоретические расчеты, мы создали базу данных коэффициентов скоростей и квантовых выходов продуктов реакций с участием $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$, $O_2(a^1\Delta_g, v)$, $O_2(X^3\Sigma_g^-, v)$ [3, 7], которая легла в основу модели электронно-колебательной кинетики продуктов фотолиза O_2 и O_3 в области МНТ (модель УМ2011). Важно подчеркнуть, что для большей части реакций в базе данных известны температурные зависимости коэффициентов скоростей реакций и диапазон их ошибок.

Эмиссионные переходы

Эмиссионные переходы $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' \leq 10 \rightarrow X^3\Sigma_g^-, v'')$, $O_2(a^1\Delta_g, v' \leq 10 \rightarrow X^3\Sigma_g^-, v'')$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' \leq 10 \rightarrow a^1\Delta_g, v'')$ образуют системы атмосферных, ИК атмосферных и полос Ноксона, соответственно. Населенность возбужденного уровня связана со скоростью объемной эмиссии (VER) при переходе с этого уровня на нижний уровень как отношение VER к коэффициенту Эйнштейна для соответствующего перехода, A_E . Поэтому коэффициенты Эйнштейна необходимы для расчета концентраций возбужденных молекул $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' \geq 0)$ и $O_2(a^1\Delta_g, v' \geq 0)$ в МНТ из измеренных VER. Кроме того, коэффициенты Эйнштейна связаны с радиационной деактивацией уровней, которая является ключевым процессом в нижней термосфере. В настоящее время не существует единой базы данных коэффициентов Эйнштейна для вышеупомянутых переходов в полосах O_2 , поэтому Янковским с соавторами были рассчитаны коэффициенты Эйнштейна для эмиссионных переходов в вышеуказанных полосах O_2 [1, 3].

Все выше рассмотренные процессы были учтены в модели кинетики продуктов фотолиза O_2 и O_3 для МНТ. Первая версия модели была опубликована в 2003 году [5], обновленная версия YМ2011 была представлена в публикациях 2011–2020 гг. В новой версии модели YМ2011 (рис. 1) мы впервые учли дополнительные каналы для образования атомов $O(^1D)$ при фотолизе озона в полосе Хаггинса, а также перенос энергии с уровней $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0, 1)$ на $O_2(X^3\Sigma_g^-, v = 9 \text{ and } 10)$. В рамках модели YМ2011 концентрации молекул $O_2(X^3\Sigma_g^-, v = 1-35)$, $O_2(a^1\Delta_g, v = 0-5)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0-2)$ и атомов $O(^1D)$ рассчитываются из решения системы 45 кинетических уравнений для этих возбужденных уровней. Система кинетических уравнений может быть решена аналитически, учитывая иерархическое расположение возбужденных уровней в зависимости от энергии.

Методы восстановления концентраций малых газовых компонент атмосферы ($O(^3P)$, O_3 , CO_2), на основе наблюдения высотных профилей кислородных эмиссий

Модель YМ2011 является самосогласованной и позволяет решать как прямые, так и обратные задачи. Под прямой задачей мы подразумеваем расчет высотных профилей концентрации возбужденных компонент кислорода в области МНТ. Концентрация молекул в возбужденном состоянии связана с объемной скоростью эмиссии (VER) через коэффициент Эйнштейна, поэтому, в рамках модели YМ2011 для различных атмосферных условий можно рассчитать высотные распределения объемных скоростей эмиссии как для традиционных кислородных полос O_2 IR Atm (0, 0) на 1,27 мкм и O_2 Atm (0, 0) на 0,762 мкм, но также и для любых рассматриваемых полос (рис. 1). Под обратной фотохимической задачей мы понимаем восстановление концентраций малых газовых компонент атмосферы (например, $O(^3P)$, O_3 , CO_2), на основе наблюдения высотных профилей концентраций излучающих уровней атомов и молекул кислорода. В обратной задаче эти возбужденные уровни проявляют себя как трассеры для восстановления концентраций $O(^3P)$, O_3 и CO_2 . Детальный анализ процессов заселения и деактивации электронно-колебательно-возбужденных молекул O_2 в области МНТ с использованием анализа чувствительности был выполнен нами в [2, 4], где показано, что высотные профили концентраций молекул на каждом из этих уровней индивидуально зависят от основных компонент атмосферы, таких как озон, атомарный кислород и двуокись углерода. Кроме того, модель YМ2011 позволяет оценить неопределенности рассчитанных концентраций возбужденных и невозбужденных компонентов в зависимости от высоты на основе анализа чувствительности модели YМ2011 ко всем ее параметрам [2, 4]. Эти позволило нам разработать новые методы для получения высотных профилей концентраций O_3 , $O(^3P)$ и CO_2 с использованием $O_2(b^1\Sigma_g^+, v = 0-2)$ и $O(^1D)$ в качестве трассеров. Подробное описание вышеупомянутых методов можно найти в [3] вместе с аналитическими формулами для получения высотных профилей концентраций O_3 , $O(^3P)$ и CO_2 . В дальнейшем мы исследовали неопределенности решения прямых и обратных задач в рамках модели YМ2011 с использованием анализа чувствительности модели и с использованием метода Монте-Карло [3]. Оценки неопределенности решения как прямой, так и обратной задач (на примере восстановления высотных профилей озона и кислорода) представлены в [3].

В качестве примера решения обратной задачи, на Рис.5 приведены высотные профили объемного отношения смеси O_3 , C_{v,O_3} и концентрации O_3 . Данные Рис. 5 получены на основании 50 событий спутникового эксперимента TIMED/SABER, в которых были измерены высотные профили объемной скорости эмиссии в полосе 1,27 мкм в день весеннего равноденствия 2010 г. Для сравнения приведены результаты восстановления высотного профиля озона, полученные в рамках предшествующей модели MSZ [1, 8], для тех же событий SABER. Напомним, что модель MSZ рассматривает чисто электронную кинетику фотолиза O_3 и O_2 .

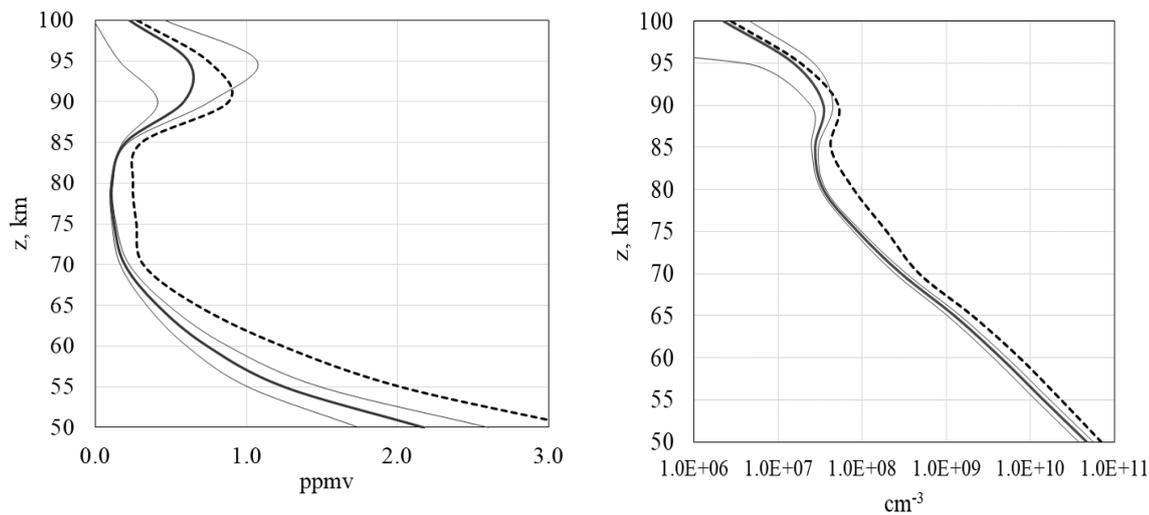


Рис. 5. Высотный профиль объемного отношения смеси O_3 , C_{v,O_3} , восстановленный из измеренных в спутниковом эксперименте TIMED/SABER высотных профилей объемной скорости эмиссии в полосе 1,27 мкм, образованной переходом $O_2(a^1\Delta_g, v=0 \rightarrow X^3\Sigma_g^-, v=0)$, для дня весеннего равноденствия 2010 г. (левая панель): сплошная жирная кривая представляет собой усредненный профиль C_{v,O_3} , полученный в рамках модели YM2011 (см. текст), сплошные тонкие кривые обозначают неопределенности профиля C_{v,O_3} , связанные с неопределенностью фотохимической модели YM2011, штриховая линия представляет собой усредненный профиль C_{v,O_3} , восстановленный в рамках модели MSZ для тех же событий SABER.

На правой панели те же самые данные и обозначения, как на левой панели, но в единицах концентрации озона (cm^{-3})

Выводы

1. Для современного понимания природы дневных эмиссий кислорода в области мезопаузы и выше необходимо рассмотреть интенсивный перенос энергии между электронно-колебательно-возбужденными синглетными уровнями молекулы кислорода, так как значительная часть этих реакций имеет высокие скорости из-за квазирезонансных эффектов при передаче энергии.
2. Созданная нами модель электронно-колебательной кинетики продуктов фотолиза O_2 and O_3 YM2011, в которой учтены все известные каналы образования $O_2(b^1\Sigma_g^+, v=0-2)$, $O_2(a^1\Delta_g, v=0-5)$, $O(^1D)$ и $O_2(X^3\Sigma_g^-, v=1-35)$, рассматривает перенос энергии между 44 электронно-колебательно-возбужденными уровнями молекулярного кислорода и возбужденного атома кислорода, включает в себя собранную за многие годы базу данных коэффициентов скорости реакции и недавно рассчитанные коэффициенты Эйнштейна.
3. Модель YM2011 позволяет нам решать как прямые, так и обратные задачи. Под прямой задачей мы подразумеваем расчет высотных профилей концентрации возбужденных компонентов кислорода в области МНТ. Под обратной фотохимической задачей мы понимаем восстановление концентраций малых газовых компонент атмосферы, молекулы которых находятся в основном невозбужденном состоянии (например, $O(^3P)$, O_3 , CO_2), на основе наблюдения высотных профилей интенсивностей эмиссий возникающих при переходах с возбужденных уровней (таких как $O_2(b^1\Sigma_g^+, v=0-2)$ и $O(^1D)$) на нижележащие уровни.
4. Базируясь на решениях обратных фотохимических задач в рамках модели YM2011, мы разработали новые методы восстановления высотных профилей концентраций O_3 , $O(^3P)$ и CO_2 с использованием $O_2(b^1\Sigma_g^+, v=0-2)$ и $O(^1D)$ в качестве трассеров.

Работа была поддержана грантами РФФИ №17-05-00532а и № 20-05-00450а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yankovsky V.A., Vorobeva E.V. Model of Daytime Oxygen Emissions in the Mesopause Region and Above: A Review and New Results // *Atmosphere*. 2020. 11, 116; doi: 10.3390/atmos11010116
2. Yankovsky V.A., Martyshenko K.V., Manuilova R.O., Feofilov A.G. Oxygen dayglow emissions as proxies for atomic oxygen and ozone in the mesosphere and lower thermosphere // *Journal of Molecular Spectroscopy*. 2016. 327, P. 209–232. doi:10.1016/j.jms.2016.03.006
3. Yankovsky V.A., Vorobeva E.V., Manuilova R.O. New techniques for retrieving the [O(³P)], [O₃] and [CO₂] altitude profiles from dayglow oxygen emissions: Uncertainty analysis by the Monte Carlo method // *Advances in Space Research*. 2019. 64, P. 1948–1967. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.07.020>
4. Yankovsky V.A., Manuilova R.O. Possibility of simultaneous [O₃] and [CO₂] altitude distribution retrievals from the daytime emissions of electronically-vibrationally excited molecular oxygen in the mesosphere. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*. 2018. 179. P. 22–33. doi:10.1016/j.jastp.2018.06.008
5. Yankovsky V.A., Manuilova R.O. Model of daytime emissions of electronically-vibrationally excited products of O₃ and O₂ photolysis: application to ozone retrieval // *Annales Geophysicae*. 2006. 24. P. 2823–2839. doi:10.5194/angeo-24-2823-2006
6. Esposito F., Armehise I., Capitta G., Capitelli M. O – O₂ state-to-state vibrational-relaxation and dissociation rates based on quasiclassical calculations // *Chemical Physics*. 2008. 351. P. 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2008.04.004>
7. Янковский В.А., Бабаев А.С. Фотолиз O₃ в полосах Хартли, Хаггинса, Шаппюи и Вульфа в средней атмосфере: колебательная кинетика молекул кислорода O₂(X, v≤35) // *Оптика Атмосферы и Океана*. 2010. 23. С. 640–649.
8. Мартышенко К.В., Янковский В.А. ИК-полоса 1.27 мкм O₂ как трассёр O₃ в мезосфере и нижней термосфере: коррекция метода // *Геомагнетизм и Аэрномия*. 2017. 57. С. 249–261; doi:10.7868/S0016794017020092

Секция 2 «Изменчивость климата и дистанционное зондирование»

УДК 551.551

Гаврилов Н.М.

Мезомасштабная изменчивость средней атмосферы по данным ГНСС спутников

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Кафедра физики атмосферы, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9
E-mail: n.gavrilov@spbu.ru

Обсуждаются результаты исследований мезомасштабных вариаций параметров тропо-стратосферы по данным низкоорбитальных спутников, принимающих радиосигналы глобальной навигационной спутниковой системы, которые проводятся на кафедре физики атмосферы СПбГУ. Использование численных фильтров при анализе вертикальных профилей радиорефракции позволяет получить информацию о дисперсии возмущений с вертикальными масштабами менее 8 км. Глобальная структура мезомасштабных дисперсий подвержена существенным межгодовым изменениям на высотах 2–35 км. Исследуются сезонные изменения мезомасштабных дисперсий радиорефракции и температуры. Ниже 15 км дисперсии повышены на широтах выше 40–50° в северном и южном полушариях в летние сезоны. На высотах 25–30 км дисперсии больше в зимние сезоны. В низких широтах наблюдаются значительные квазидвухлетние колебания. Причинами мезомасштабных вариаций могут быть конвекция, акустико-гравитационные волны и турбулентность.

Ключевые слова: средняя атмосфера, температура, акустико-гравитационные волны, климатология, радиорефракция, ГНСС спутники.

Gavrilov N.M.

Mesoscale variability of the middle atmosphere from the data of GNSS satellites

Saint-Petersburg State University, Atmospheric Physics Department, Russia, 199034, Saint-Petersburg, Universitetskaya Embarkment, 7–9
Email: n.gavrilov@spbu.ru

Discussed are results on mesoscale variations in the parameters of the troposphere and stratosphere using data of low-orbital satellites registering radio signals of the global navigation satellite systems, which were obtained in the Atmospheric Physics Department of Saint-Petersburg State University. Usage of numerical filters for analyses of vertical profiles of radio-refraction allows obtaining information about disturbances with vertical scales less than 8 km. Global structures of mesoscale variances experience essential year-to-year changes at altitudes 2–35 km. Seasonal changes in the mesoscale variances of radio-refraction and temperature are studied. At altitudes lower than 15 km, the variances are larger at latitudes higher 40–50° in summer seasons of both the Northern and Southern Hemispheres. At altitudes 25–30 km, the variances are larger in winter seasons. At low latitudes, quasi-bi-annual oscillations are observed. Reasons for mesoscale variations could be convection, acoustic-gravity waves and turbulence.

Keywords: middle atmosphere, temperature, acoustic-gravity waves, climatology, radio-refraction, GNSS satellites.

Введение

В последние годы большое внимание уделяется изучению мезомасштабных динамических процессов в средней атмосфере [1]. Для этого широко используются спутниковые дистанционные измерения, которые обеспечивают глобальную информацию о динамических структурах и мезомасштабных возмущениях параметров атмосферы. После появления глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), последние широко используются для зондирования атмосферы. Высоты

орбит передающих спутников ГНСС около 20000 км. Радиосигналы от этих спутников могут регистрироваться приемниками на низкоорбитальных спутниках (называемых ниже как «ГНСС спутники»).

Первый эксперимент по радиопросвечиванию атмосферы сигналами ГНСС был проведен на спутнике MicroLab-1 (эксперимент GPS/MET) в 1995–1997 [2]. Лимбовые фазовые измерения позволяют получить вертикальные профили показателя преломления атмосферы. Гурвич и др.[3] показали, что флуктуации фазы принимаемого радиосигнала пропорциональны флуктуациям показателя преломления, проинтегрированным вдоль радиолуча. Эксперимент GPS/MET дал обширную информацию о мезомасштабных возмущениях [4–7], которые могут создаваться динамическими и волновыми процессами в атмосфере. Исследования [4, 8] показали хорошее соответствие между мезомасштабными возмущениями в тропо-стратосфере, измеренными в эксперименте GPS/MET и регистрируемыми МСТ радаром в Японии и Северной Америке. Исследования мезомасштабных вариаций были продолжены на ГНСС спутнике CHAMP в 2001–2009 гг. В последние годы указанные исследования проводятся с помощью спутниковой группировки COSMIC, запущенной в 2006 г. Значительная часть указанных исследований посвящена оценке параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ) [9, 10].

Исследования мезомасштабных возмущений и волновых структур по данным ГНСС спутников проводятся на кафедре физики атмосферы СПбГУ, начиная с 1999 г. В [6, 7] анализировались данные эксперимента GPS/MET для исследования мезомасштабной изменчивости на высотах 0–35 км с использованием фильтрации вертикальных профилей показателя преломления атмосферы. В [11, 12] была проанализирована широтно-долготная структура параметров мезомасштабных волн в тропо-стратосфере по данным ГНСС спутника CHAMP. Эти структуры выявили значительную неоднородность мезомасштабных вариаций. Поэтому, для получения надежных оценок климатологических особенностей широтно-долготной структуры мезомасштабных вариаций в атмосфере требуются большие объемы экспериментальных данных.

В данном исследовании описываются результаты анализа вертикальных профилей показателя преломления атмосферы по данным GNSS спутников COSMIC в 2006–2017 гг. Эти профили получены из базы данных Центра анализа и архивации данных COSMIC [13]. Получены многолетние широтно-высотные и широтно-долготные распределения дисперсий мезомасштабных вариаций атмосферных параметров в тропо-стратосфере. Изучаются корреляции мезомасштабной изменчивости со статической устойчивостью атмосферы.

Метод анализа данных

При распространении радиоволн сантиметрового диапазона через атмосферу их траектории изгибаются, а скорость распространения уменьшается обратно пропорционально показателю преломления n . Измерения разностей фаз для различных путей прохождения волн от различных спутников ГНСС позволяют определить координаты приемника, а также вертикальные профили радиорефракции $N_r = (n-1) \times 10^6$. В тропо-стратосфере N_r уменьшается с высотой пропорционально уменьшению плотности атмосферы. При анализе информации ГНСС спутников часто оценивается так называемая «сухая температура» $T_d = Cp/N_r$, где p – давление в мб, а постоянная $C = 77.6$ К/мб. Сухая температура дает хорошую оценку температуры атмосферы в стратосфере. В тропосфере, влажность может влиять на показатель преломления, и сухая температура может отличаться от окружающей температуры воздуха. На высотах более 30–35 км становятся значительными ошибки из-за исключения вклада ионосферы [3]. Динамические процессы в атмосфере создают изменения давления, δp , температуры, δT , и других параметров. Для мелкомасштабной турбулентности и низкочастотных коротких ВГВ обычно $|\delta p/p| \ll |\delta T/T|$ и можно получить соотношение $\delta T_d/T_d \approx \delta N_r/N_r$, имеющее достаточную точность [6, 7].

Для выделения мезомасштабных вариаций используются численные полиномиальные фильтры [6, 7]. Сначала на каждой высоте z_i вычисляются длинноволновые сглаженные значения $T_{d0}(z_i)$ и $\ln N_{r0}(z_i)$ путем аппроксимации профилей сухой температуры и радиорефракции полиномами второго порядка методом наименьших квадратов внутри скользящих высотных слоев толщиной $\Delta z \sim 5-10$ км, центрированных на z_i . После этого, мезомасштабные атмосферные компоненты с вертикальными длинами $\lambda_z < 4-8$ км оцениваются как относительные отклонения от этих сглаженных значений: $\delta N_r/N_{r0}$ и $\delta T_d/T_{d0}$.

Указанная выше фильтрация может переоценивать амплитуды возмущений вблизи резкой тропопаузы [9, 14, 15]. Для уменьшения артефактов тропопаузы в данном анализе использовались только

значения для которых разница между вертикальными температурными градиентами на верхней и нижней границах аппроксимационного слоя меньше 6 К/км. После такого отбора рассчитываются дисперсии полученных мезомасштабных отклонений для каждого месяца во время измерений ГНСС спутниками.

Результаты анализа

Используя описанный выше метод, в данном исследовании анализируются данные, полученные ГНСС спутниками COSMIC в 2006–2017 гг. с использованием высотных аппроксимационных интервалов $\Delta z = 10$ км (см. п. 2). Полученные температуры, усредненные за все годы для отдельных месяцев, показаны на рис. 1, а соответствующие мезомасштабные дисперсии радиорефракции – на рис. 2. Эти распределения совпадают с аналогичными распределениями, полученными ГНСС спутниками GPS/МЕТ и CHAMP [6, 7, 12]. На рис. 2 максимумы $\delta T_d/T_{d0}$ существуют на высотах 15–25 километров на экваториальных широтах и могут быть связаны с волновыми движениями и тропической глубокой конвекцией. Численное моделирование и эксперименты с японским МУ радаром показали, что резкое увеличение частоты Брента-Вяисяля может приводить к соответствующему увеличению амплитуд атмосферных мезомасштабных волн, распространяющихся снизу [16].

На рис. 2 можно увидеть также повышенные дисперсии в тропосфере, которые могут соответствовать областям тропо-стратосферных струйных течений (см. [17]), расположенных над тропопаузой, а также могут усиливаться другими источниками волн и неустойчивостей в атмосфере. Сравнение левой и правой частей рис. 2 выявляет сезонные изменения в мезомасштабных дисперсиях, которые в тропосфере средних и высоких широт больше в летний сезон. На высотах более 20 км дисперсии больше в зимние сезоны северного и южного полушарий.

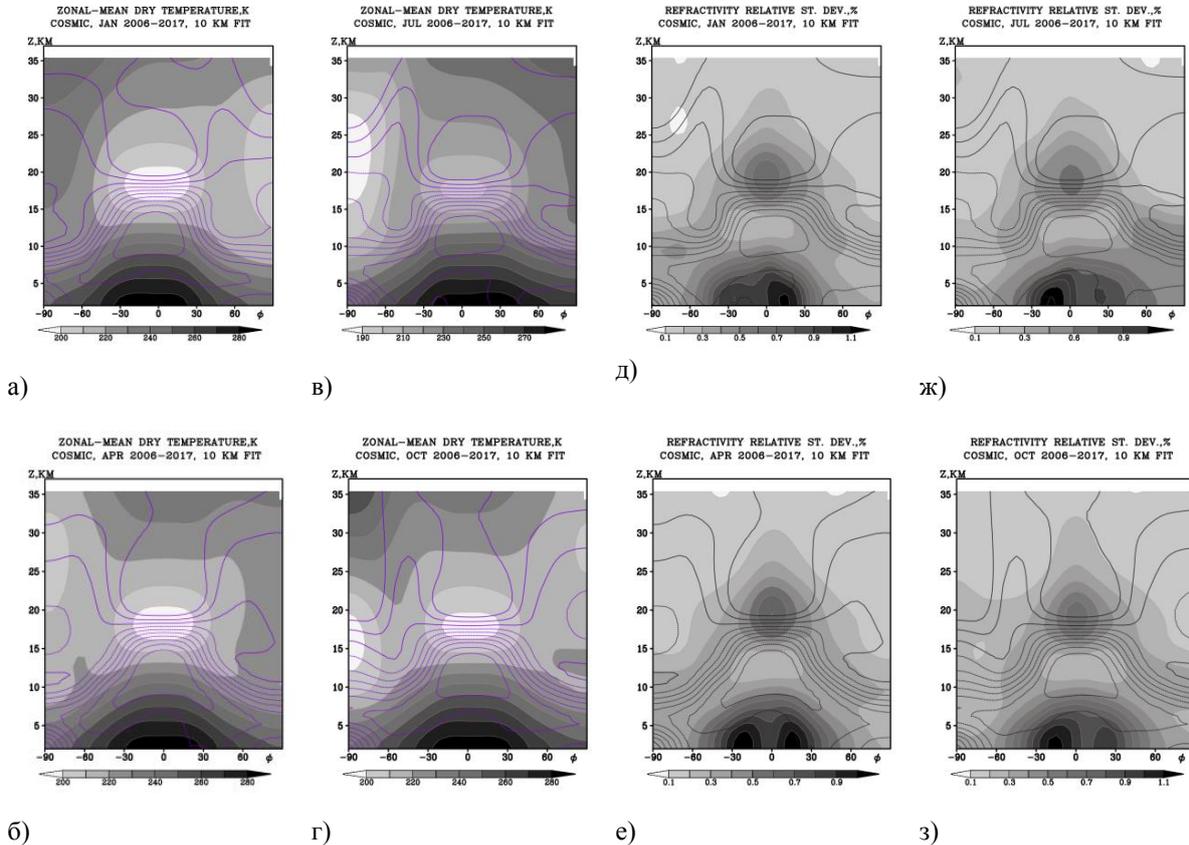


Рис. 1. Средняя за 2006–2017 гг. сухая температура (в К) в январе (а), апреле (б), июле (в) и октябре (г). Линии показывают dT_{d0}/dz

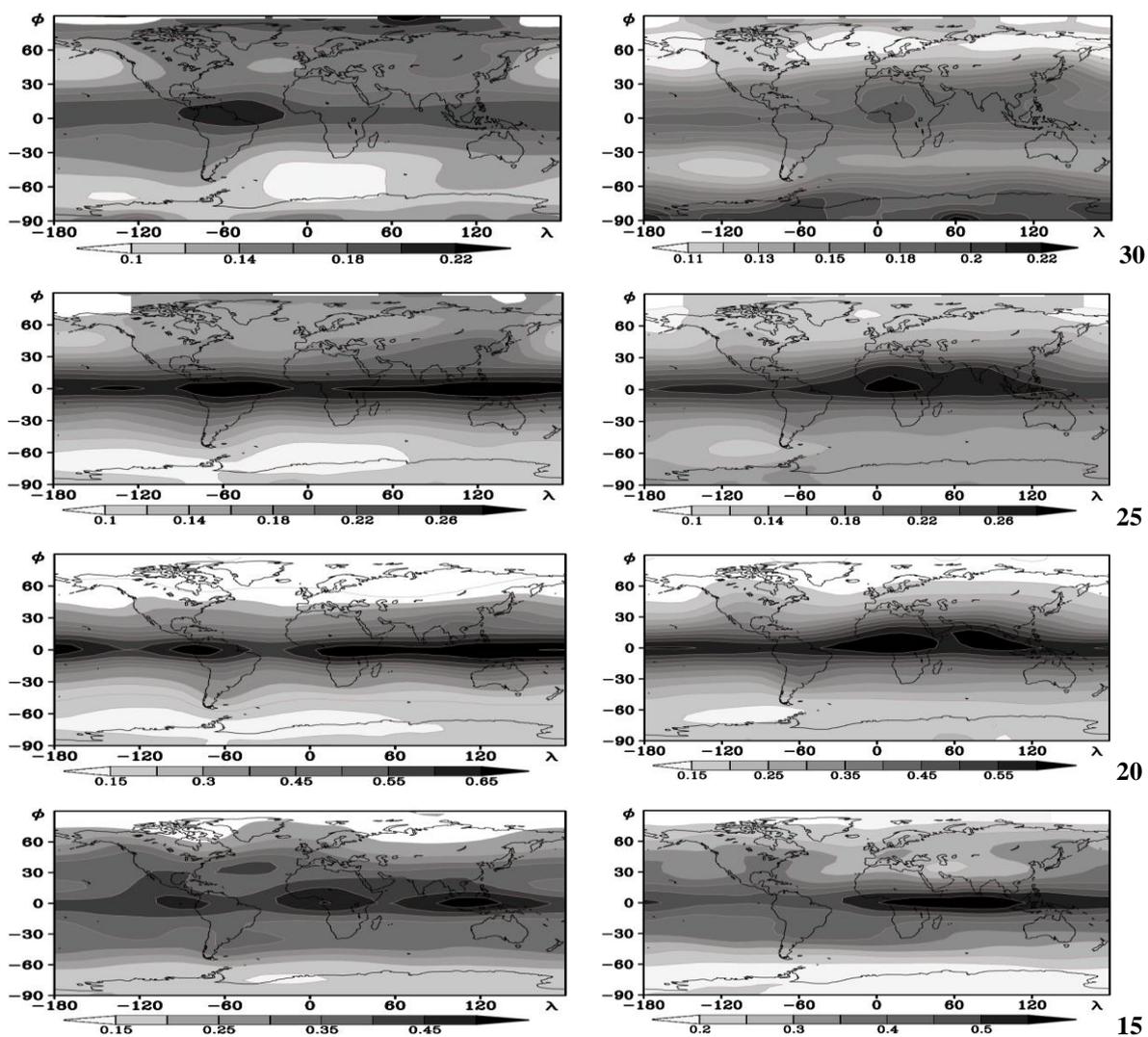
Рис. 2. Средние за 2006–2017 гг. относительные дисперсии мезомасштабных вариаций радиорефракции (в %) в январе (д), апреле (е), июле (ж) и октябре (з)

Рис. 3 представляет широтно-долготные распределения мезомасштабных дисперсий сухой температуры в различных высотных слоях для января и июля в северном полушарии по данным ГНСС спутников COSMIC. На рис. 3 дисперсии сухой температуры на высотах менее 10 км имеют максимумы в экваториальной зоне и в высоких широтах летних полушарий. Аналогичные распределения относительных дисперсий $\delta N_r/N_{r0}$ были получены ранее из данных GPS/МЕТ [6, 7] и из данных CHAMP [11, 12]. Подобное распределение для потенциальной энергии ВГВ выше 5 км в декабре 2006 было

получено в [17] из данных COSMIC. Это показывает хорошую стабильность и воспроизводимость зональных средних распределений мезомасштабных дисперсий в различных спутниковых экспериментах и в разные годы.

На высотах около 10 км среднеширотные максимумы дисперсий на рис. 3 коррелируют с положениями тропосферных струйных течений, которые имеют максимумы на высотах 10–12 км (см. [17]). На высотах 15–25 км на рис. 3, максимумы на широтах между -20° и 20° могут быть связаны с конвективными и волновыми процессами в экваториальной зоне. Левые и правые части рис. 3 соответствуют январю и июлю. Наибольшие сезонные различия наблюдаются выше 20 км, где мезомасштабные дисперсии больше в зимние сезоны каждого полушария.

Изменения показателя преломления могут быть вызваны динамическими процессами, создающими неоднородности атмосферных характеристик. Поэтому, дисперсии сухой температуры на рис. 2 и 3 могут отражать изменения интенсивности мезо-метеорологических и конвективных процессов, атмосферных волн и турбулентности. В тропосфере, амплитуды ВГВ обычно малы и мезомасштабная турбулентность может давать основной вклад. С ростом высоты амплитуды ВГВ увеличиваются и их вклад в мезомасштабную изменчивость показателя преломления возрастает.



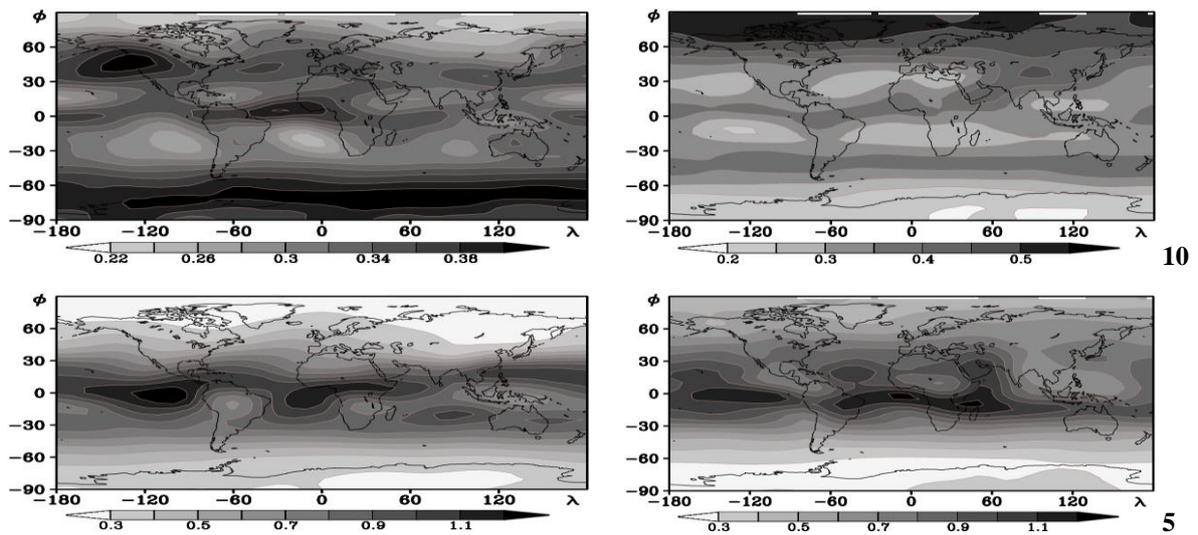
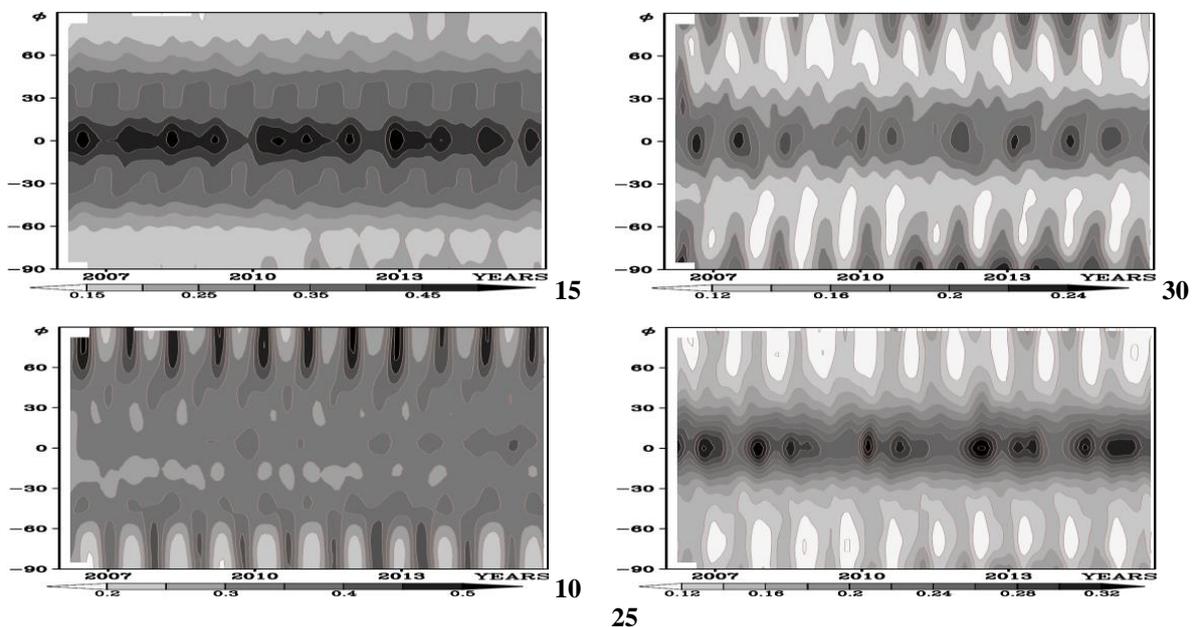


Рис. 3. Средние за 2006–2017 гг. мезомасштабные дисперсии сухой температуры (в К) на различных высотах (указаны справа цифрами в км) в январе (слева) и в июле (справа)

Сезонные изменения лучше видны на рис. 4, который показывает широтно-временные изменения на разных высотах. Эти изменения могут отражать сезонную изменчивость источников мезомасштабных волн и фильтрующих свойств атмосферы при их распространении. Аналогичные изменения дисперсий $\delta N_r/N_{r0}$ были получены ранее из данных спутника CHAMP в [12]. На рис. 4 можно видеть годовые изменения дисперсии сухой температуры в средних и высоких широтах. На высотах 5–10 км дисперсия радиорефракции имеет максимумы на широтах выше 40–50° в летние сезоны северного и южного полушарий. На высотах 25–30 км на рис. 4 максимумы наблюдаются в зимние сезоны каждого полушария. В экваториальной зоне на высотах более 15 км существуют двухлетние колебания (см. рис. 4).



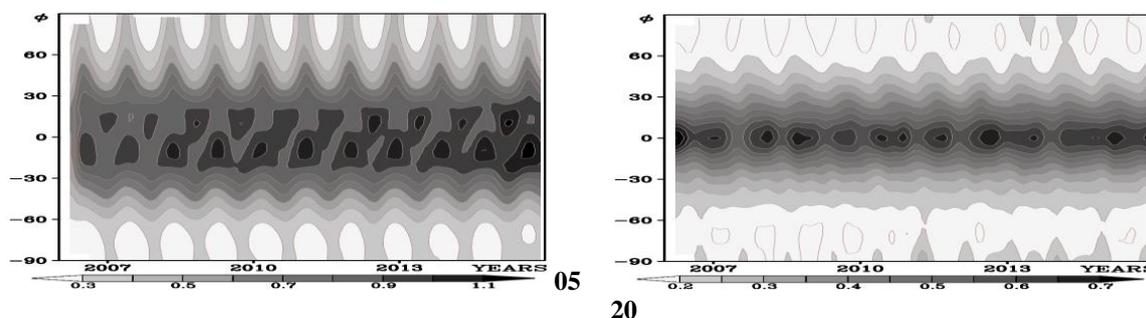


Рис. 4. Широтно-временные изменения сухой температуры (в К) на различных высотах (указаны числами в км)

В [17] анализировались распределения квадрата частоты Брента-Вяисля, N^2 , аналогичные рис. 4. В тропосфере на средних и высоких широтах обоих полушарий N^2 имеет максимумы в летние сезоны. Они соответствуют изменениям мезомасштабных дисперсий на рис. 4. В стратосфере выше 20 км максимумы N^2 сдвигаются в зимние сезоны в обоих полушариях. В экваториальной зоне на высотах около 20 км существуют квази-двухлетние колебания N^2 . Эти колебания соответствуют квази-двухлетним колебаниями дисперсий на рис. 4.

Заключение

В данной статье выполнен анализ изменений показателя преломления атмосферы и сухой температуры на высотах 2–35 км по данным многолетних экспериментов с использованием ГНСС спутников. Эти изменения могут давать информацию о глобальном распределении динамически активных зон в атмосфере, где можно ожидать усиления мезомасштабной турбулентности и генерации ВГВ. Изменения струйных течений и частоты Брента-Вяисля могут влиять на временную и пространственную структуру мезомасштабных вариаций температуры атмосферы и показателя преломления. Зонально-осредненные дисперсии мезомасштабных вариаций температуры имеют главные максимумы на высотах 15–20 км на широтах между -20° и 20° . Они, вероятно, связаны с атмосферной конвекцией и волнами в экваториальной атмосфере. На высотах около 10 километров, максимумы мезомасштабных дисперсий коррелируют с расположением струйных течений в верхней тропосфере. Выше 25 км, дисперсии температуры больше зимой, чем летом в обоих полушариях. Существует положительная корреляция между изменениями мезомасштабных дисперсий температуры и частоты Брента-Вяисля в тропосфере.

Настоящее исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований по гранту № 19-35-90130. Автор благодарен Центру анализа и архивации данных COSMIC за предоставление данных ГНСС спутников. В работе использованы данные ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

ЛИТЕРАТУРА

1. Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B., Middle atmosphere dynamics/ San Diego, Academic Press, San Diego. 1987. 485 p.
2. Rocken C., Athes R., Exner M., Hunt D., Sokolovskiy S., Ware R., Gorbunov M., Schreiner W., Feng D., Herman B., Kuo Y.-H., Zou, X. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere // Journal Geophysical Research. 1997. V. 102. N. D25. P. 29849–29866.
3. Gurvich A.S., Kan V., Fedorova O.V. Radio sounding of the stratosphere with satellites GPS-Microlab-1: Phase fluctuations // Izvestiya Atmospheric Oceanic Physics. 2000. V. 36. N. 3. P. 300-308.
4. Tsuda T., Nishida M., Rocken C., Ware R. H. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET) // Journal Geophysical Research. 2000. V. 105. N. D6. P. 7257–7274.
5. Alexander M.J., Tsuda T., Vincent R.A. Latitudinal variations observed in gravity waves with short vertical wavelengths // Journal Atmospheric Science. 2002. V. 59. N. 8. P. 1394–1404.
6. Гаврилов Н.М., Карпова Н.В. Глобальная структура мезомасштабной изменчивости атмосферы по спутниковым измерениям рефракции радиоволн // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 6. С. 747–758.

7. Gavrilov N.M., Karpova N.V., Jacobi Ch., Gavrilov A.N. Morphology of atmospheric refraction index variations at different altitudes from GPS/MET satellite observations // *Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*. 2004. V. 66. N. 6-9. P. 427–435.
8. Nastrom G.D., Hansen A.R., Tsuda T., Nishida M., Ware R.A. comparison of gravity wave energy observed by VHF radar and GPS/MET over central North America // *Journal Geophysical Research*. 2000. V. 105. N. D4. P. 4685–4687.
9. Wang L., Alexander M.J. Global estimates of gravity wave parameters from GPS radio occultation temperature data // *Journal Geophysical Research*. 2010. V. 115. N. D21122, doi:10.1029/2010JD013860.
10. Schmidt T., De la Torre A., Wickert J. Global gravity wave activity in the tropopause region from CHAMP radio occultation data // *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35. N. L16807. doi:10.1029/2008GL034986.
11. Гаврилов Н.М. Структура мезомасштабной изменчивости тропо-стратосферы по измерениям рефракции радиоволн на спутнике CHAMP // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43, № 4. С. 492–501.
12. Gavrilov N.M. and Manuilova R.O. Long-term global distribution of mesoscale variations in atmospheric radio refraction from the data of GPS satellite CHAMP // *Radiophysics Quantum Electronics*. 2016. V. 59(7), 535–545.
13. CDAAC. COSMIC data analysis and archive center / 2016. <http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>, (June 15, 2016).
14. Horinouchi T., Tsuda T. Spatial structures and statistics of atmospheric gravity waves derived using a heuristic vertical cross-section extraction from COSMIC GPS radio occultation data // *Journal Geophysical Research*. 2009. V. 114. N. D16110. doi:10.1029/2008JD011068.
15. Gavrilov N.M. Peculiarities of approximation of meteorological characteristics having vertical gradient discontinuities close to the tropopause // *Russian Meteorology Hydrology*. 2013. V. 38(6). P. 382–386.
16. Gavrilov N.M., Fukao S. Numerical and the MU radar estimations of gravity wave enhancement and turbulent ozone fluxes near the tropopause // *Annales Geophysicae*. 2004. V. 22. P. 3889–3898.
17. Alexander S.P., Tsuda T., Kawatani, Y. COSMIC GPS Observations of Northern Hemisphere winter stratospheric gravity waves and comparisons with an atmospheric general circulation model // *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35. N. L10808. doi:10.1029/2008GL033174.
18. Gavrilov N.M., Manuilova R.O. Multi-year changes of mesoscale variations in atmospheric parameters from the data of GNSS satellites // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2017. V. 10466. № 23. P. 1046679. doi: 10.1117/12.2284632.

Груздев В.Н.^{1,2}, Шилин Б.В.^{1,2*}

Место видеоспектральной съёмки среди методов дистанционного зондирования

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук, Корпусная ул., д. 18, г. Санкт-Петербург, 197110, Россия

²Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Россия

*E-mail: bshilin@rambler.ru

Рассматривается место видеоспектральной съёмки среди методов дистанционного зондирования как современный качественно новый этап развития от многозональной – многоспектральной съёмки с ограниченным количеством формирующих изображения спектральных каналов до систем с первыми сотнями каналов (гиперспектральные-видеоспектральные системы). Представлены структурные схемы аэрокосмической и полевой видеоспектральной съёмки, оптическая схема видеоспектрометра и характеристики опытных образцов приборов. Приводятся и анализируются материалы авиационной и полевой видеоспектральной съёмки в виде серий монохромных изображений и построенных по ним спектральным кривым объектов ландшафта.

Ключевые слова: видеоспектральная съёмка, спектральные характеристики, видеоспектрометр.

Victor N.Gruzdev^{1,2}, Boris V. Shilin^{1,2*}

The place of video spectral shooting among remote sensing methods

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, 18, Korpusnaya st., St. Petersburg, 197110, Russia

²Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky St. Petersburg, 197198, Russia

*E-mail: bshilin@rambler.ru

The place of video spectral shooting among remote sensing methods is considered as a modern qualitatively new stage of development from multispectral - multispectral shooting with a limited number of spectral channels forming images to systems with the first hundreds of channels (hyperspectral-video spectral systems). The block diagrams of aerospace and field video spectral photography, the optical scheme of the video spectrometer and the characteristics of the prototype devices are presented. The materials of aerial and field video spectral shooting in the form of a series of monochrome images and the spectral curves of landscape objects constructed from them are presented and analyzed.

Keywords: video spectral shooting, spectral characteristics, video spectrometer.

Введение. История вопроса

Дистанционные аэрокосмические методы оптического диапазона иконического вида (дающие информацию в виде изображения) развивались на начальном этапе как интегральные – регистрировалось излучение в широком диапазоне длин волн, например, панхроматическая аэрофотосъёмка. Реализовывались также спектральные различия в нескольких также достаточно широких интервалах, это спектрозональная аэрофотосъёмка с различными комбинациями в системе объектив-фотоплёнка.

Резким скачком в тематическом использовании спектральных различий явилось создание оптико-электронных сканеров – приборов, включающих оптические системы сканирования (обзора) площади и фотоэлектрические приёмники с различной спектральной чувствительностью в ультрафиолете-видимом-ближнем ИК-тепловом диапазонах (0.3–13.5) мкм и позволяющих получать синхронно серию

изображений (снимков) в достаточно узких спектральных зонах (на первом этапе 5–15 каналов). С созданием всё более чувствительных приёмников излучения разрабатывались авиационные многоспектральные-гиперспектральные сканеры с всё большим количеством спектральных каналов. В 70-х–90-х гг. прошлого века наиболее известны фирмы Daedalus и GER, которыми выпускались авиационные сканеры с количеством каналов от двух до первых сотен. Последние приборы позволяют строить детальные спектры объектов в пределах пикселя прибора и, таким образом, перейти к прямому решению обратной задачи дистанционного зондирования – определению вещественного состава и состояния объектов земной поверхности.

Уже в начале развития аэрофотосъёмки параллельно ставились исследования в лаборатории, в поле, а позднее и с авианосителей спектральных характеристик объектов земной поверхности с помощью точечных (профильных) спектрорадиометров. На первом этапе - в видимом диапазоне (0.4–0.7) мкм, далее до 2.5 мкм и в диапазоне (8.0–13.5) мкм. Эти исследования позволили понять фундаментальные различия спектральных характеристик объектов, правильно подойти к проектированию нового аэросъёмочного оборудования и дешифрированию аэроснимков. Спектрорадиометры впервые позволили подойти к решению задачи определения вещественного состава и состояния объектов, однако в авиационном варианте возможности здесь профильных спектрорадиометров были ограничены изучением протяжённых объектов – акваторий, лесов, крупных массивов посевов, снежно-ледяным покровом моря и суши и т.п. [1].

Объединить достоинства обеих групп приборов, то есть реализовать высокое пространственное и спектральное разрешение оказалось возможным с появлением видеоспектрометров-гиперспектрометров – приборов на основе полихроматоров и приёмников матричного типа.

Структурная схема видеоспектральной съёмки

Структурная схема гиперспектральной-видеоспектральной аэросъёмки представлена на рисунке 1 [2]. В рассматриваемой схеме в гиперспектральном сканере излучение, идущее от узкой полосы земной поверхности, попадает в оптико-электронную систему развёртки по строке и спектру (ОЭССС). В гиперспектральных авиационных сканерах это оптико-механический блок, объектив, диспергирующие устройства, блок приёмников с различной спектральной чувствительностью, усилители и т.д. В видеоспектрометрах это объектив, полихроматор, регистрирующая матрица.

ОЭССС формирует так называемый полихроматический или спектральный кадр – серию монохромных изображений (строк) одной полосы местности в узких спектральных интервалах. За счёт движения авианосителя каждая строка формируют так называемый информационный параллелепипед.

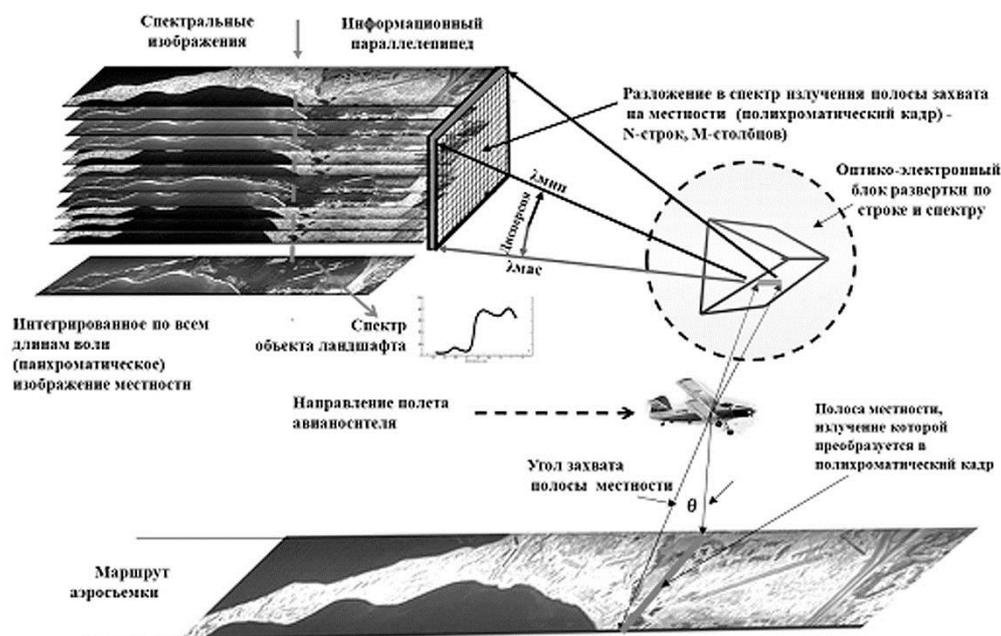


Рис. 1. Структурная схема видеоспектральной аэросъёмки

Информация по вертикальной координате информационного параллелепипеда представляет собой спектр уходящего (собственного или отражённого) излучения элемента земной поверхности, соответствующего мгновенному полю зрения прибора.

При полевых работах съёмка выполняется видеоспектрометром, установленным на поворотной платформе. При вращении платформы формируется информационный параллелепипед, «ориентированный горизонтально» на вертикальную панораму (рис.2) [3]. Возможно проведение съёмки с наклонных трасс с каких либо возвышенностей.

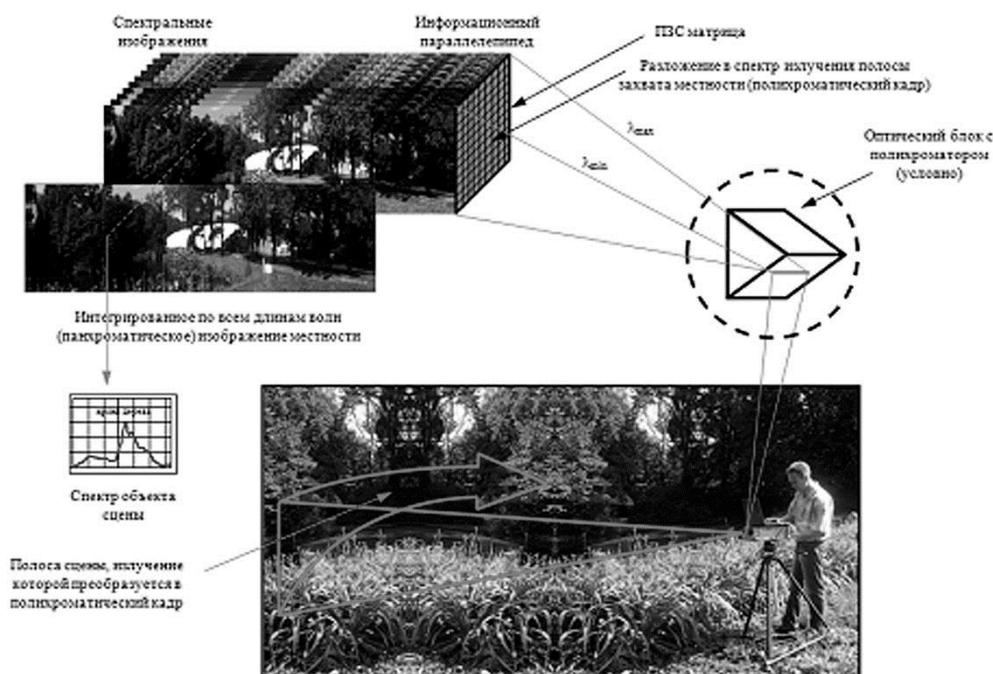


Рис. 2. Структурная схема полевой видеоспектральной съёмки

В информационный параллелепипед «входят» все методы дистанционного зондирования оптического диапазона. Так, панхроматическая аэрофотосъёмка представляет один горизонтальный срез параллелепипеда в виде изображения, суммирующего излучение по всем длинам волн видимого диапазона. Многозональная аэрофотосъёмка представляет несколько горизонтальных срезов, каждый из них характеризует излучение значительной части (примерно 100 нм) видимого или ближнего ИК диапазонов. Спектральные характеристики объектов описываются одной точкой для панхроматического снимка и несколькими точками для многозональной съёмки. Для многоспектральной-гиперспектральной аэросъёмки (см. ниже) сканерами типа GER – 211 имеем соответственно 211 срезов (монохромных изображений) и столько же точек на спектральной кривой уходящего излучения объекта.

Гиперспектрометры с пространственным сканированием являются первыми устройствами для получения узкоспектральных монохромных изображений подстилающей поверхности. Это оптико-механические сканеры с широким полем обзора (90° и более), что обеспечивает захват большой полосы съёмки на местности и высокую производительность аэросъёмочных работ. Основные недостатки сканеров – значительные масса, габариты, энергопотребление и стоимость. Важнейшее достоинство – возможность получения изображений и спектров во всём оптическом диапазоне (0.3–13.5) мкм, что существенно увеличивает достоверность тематической интерпретации.

Видеоспектрометры

За рубежом авиационные видеоспектрометры известны с начала 80-х гг. прошлого века, и в настоящее время существуют десятки модификаций. В последнее десятилетие создаются и запускаются в экспериментальном плане видеоспектрометры космического базирования [4] причём этому направлению уделяется большое внимание программами NASA и ESA. Видеоспектральные аэрокосмические съёмки

ведутся в интересах геологии, сельского и лесного хозяйства, экологической безопасности, создаются банки видеоспектральных данных.

К сожалению, у нас в стране развитие видеоспектральной съёмки идёт очень медленно. В последние годы появились опытные образцы авиационных и космических видеоспектрометров. В качестве примера здесь приводится краткое описание отечественных видеоспектрометров НИУ ИТМО (таблица 1). Видеоспектрометры построены по одной оптической схеме (рис. 3) с небольшими различиями по входному объективу [5].

В рассматриваемой схеме излучение, идущее от узкой полосы земной поверхности через девятилинзовый или трёхлинзовый входной объектив, входную щель полихроматора, нанесенную на плоскую поверхность линзы-коллектива и коллиматорный объектив, попадает на диспергирующий элемент – плоскую отражательную дифракционную решетку, разлагающую излучение в спектр. Направление входной щели полихроматора и плоскость дисперсии взаимно перпендикулярны. Развернутое диспергирующим элементом спектральное изображение щели отображается камерным объективом на матричном приемнике. При этом каждая строка считываемого спектрального или полихроматического кадра соответствует монохромному (узкоспектральному) видеоспектральному изображению одной и той же узкой полосы земной поверхности. Все монохромные изображения формируют информационный параллелепипед (рис. 1 и 2).

Данные матрицы считываются с периодом, обеспечивающим непрерывность изображения при аэросъёмке или полевой съёмке. Программы опроса матриц индивидуальны, но формат сформированного файла выбирается доступным для применения стандартных программных продуктов обработки мультиспектральной информации: ENVI, ERDAS, ALBEDO.

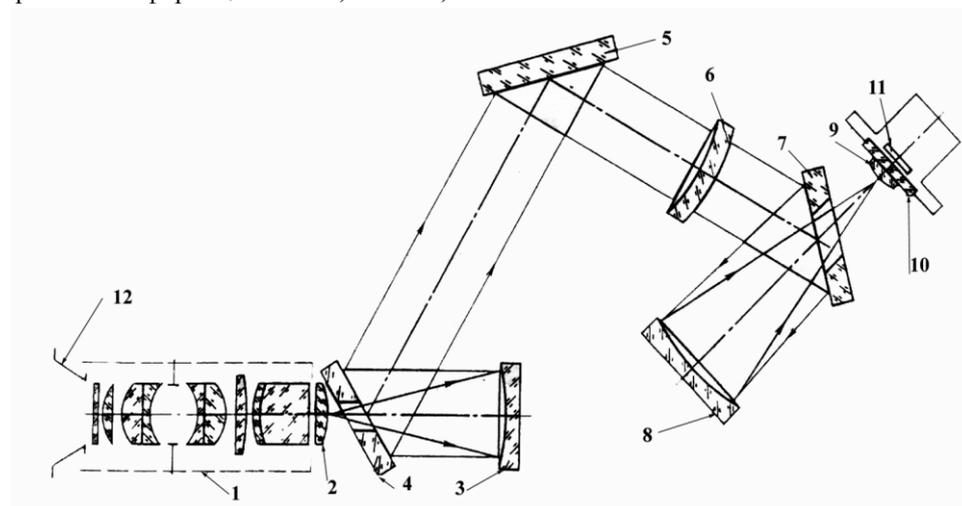


Рис. 3. Оптическая схема видеоспектрометра.

- 1 – входной объектив, 2 – плосковыпуклая линза-коллектив с нанесённой на неё входной щелью,
 3 – коллиматорный объектив, 4,7 – плоские зеркала, 5 – дифракционная решетка,
 6 – вогнуто-выпуклый мениск, 8 – камерный объектив, 9 – составная выпукло-плоская линза,
 10 – защитное стекло, 11 – ПЗС матрица, 12 – бленда

Таблица 1

Основные технические характеристики видеоспектрометров НИУ ИТМО

Параметр	Значение	
	Широкоугольный вариант	Узкоугольный вариант
Фокусное расстояние входного объектива, мм	19,2	100
Относительное отверстие	1:4	1:4
Ширина входной щели, мм	0,1 или 0,05	0,1
Поле зрения, град	28,2 x 0,3	5,5 x 0,15
Спектральный диапазон, мкм	0,4-1,0	0,5 – 1,1
Спектральное разрешение, нм	1,7	
Линейная дисперсия, мм/мкм	14	
Энергопотребление, Вт	10	10

Поток информации,	примерно 1,5 МБ/сек.	
Масса, кг	8	5
Габариты (высота x длина x ширина), мм	500x400x150	350x400x150

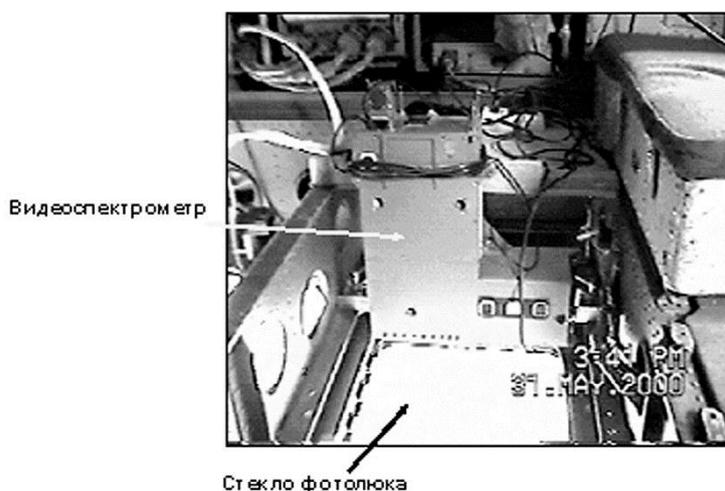


Рис. 4. Широкоугольный видеоспектрометр в третьем фотолюке самолета Ан-30

Оба прибора имеют резервы по уменьшению массы и габаритов. Внешний вид «широкоугольного» видеоспектрометра представлен на рис. 4.

Первым видеоспектрометром, выпущенным малой серией, был прибор CASi фирмы Itres Research Ltd., Канада. Он имеет диапазон спектральной чувствительности 0.4–0.9 мкм, спектральное разрешение от 1.8 нм (может быть выбрано по желанию исследователя), мгновенное поле зрения 1.0 мрад (это соответствует разрешению на местности примерно 1.0 м при высоте полёта 1000 м), угол обзора 45 град. В конце 90-х гг. был выпущен усовершенствованный вариант видеоспектрометра – CASi 2. Модернизация оказалась связанной с расширением области спектральной чувствительности до 1000 нм, улучшением методики спектральной калибровки, уменьшением массы, габаритов и энергопотребления. В последнее время известны модификации приборов этой фирмы для ближнего ИК и теплового диапазонов.

Видеоспектрометр CASi сразу нашёл широкое применение в исследовательских работах по изысканию принципиально новых возможностей многоспектральных средств дистанционного зондирования.

Заметным конкурентом CASi стали видеоспектрометр AISA (Spectral Imaging Ltd., Финляндия), который успешно используется в лесном хозяйстве при изучении спектральных различий на разных стадиях вегетации, при обнаружении сорняков, поражённых болезнью участков посевов и т.д. Фирма Spectral Imaging Ltd. выпускает видеоспектральные приборы для видимого, ближнего ИК и теплового диапазонов.

Хорошо известны примеры успешного применения экспериментального видеоспектрометра AVIRIS, разработанного Jet Propul. Lab., США для целей геологического картирования. Прибор имеет область спектральной чувствительности 0.4–2.4 мкм, которая делится на 220 монохромных каналов, мгновенное поле зрения 1 мрад, угол обзора 20 град. По данным аэросъёмки с видеоспектрометром AVIRIS в геологически открытых районах помимо основных типов горных пород хорошо выделяются слабо выраженные рудоконтролирующие зоны вторичных гидротермальных изменений.

Укажем ещё некоторые зарубежные спектрометры. ROSIS (Космическое агентство Германии) имеет область спектральной чувствительности 0.43–0.85 мкм с разделением на 85 монохромных каналов, мгновенное поле зрения 0.55 мрад, угол обзора 32 град. Видеоспектрометр университета г. Данди, Шотландия имеет 576 спектральных каналов в интервале спектральной чувствительности (0.42–1.06) мкм. Видеоспектрометр Santa Barbara Research Center имеет две модификации. Первая с областью спектральной чувствительности (0.4–0.6) мкм и (0.6–1.0) мкм делится соответственно на 129 и 265 монохромных каналов, мгновенное поле зрения 0.66 мрад, угол обзора 19.1 град; вторая с областью спектральной чувствительности (1.0–1.8) мкм делится на 90 каналов, мгновенное поле зрения 0.66 мрад, угол обзора 12 град.

Целый ряд видеоспектрометров создан и разрабатывается для различных программ NASA и ESA.

Для зарубежных видеоспектрометров следует отметить использование в подавляющем большинстве случаев в качестве полихроматора дифракционной решётки. Очень редко в диапазоне (0.4 – 1.0) мкм используются призмы, которые имеют некоторые преимущества – большую светосилу и простоту изготовления. По этому пути пошли отечественные разработчики опытных образцов - ЗАО «Лептон», ЗАО «Реагент», Красногорский ОМЗ. Приборы с полихроматором на призме имеют принципиальный недостаток - переменное разрешение по спектру: от 1.5 мкм в фиолете до (10–13) мкм в ближнем ИК. Красный-ближний ИК участок является основным для диагностики и дифференциации растительности по положению и крутизне «красного края» в интервале (700–750) нм и высоте «ИК-плато» (750–950) нм. Ухудшение детальности спектральных кривых в диапазоне (600–1000) нм заметно ограничивает возможности решения прикладных тематических задач. Поэтому оптимальным представляется использование видеоспектральной системы видимого-ближнего ИК диапазона на дифракционной решётке.

Заключение

Анализ общего состояния разработок видеоспектральных авиационных систем и их практического применения позволяет сделать вывод, что для решения широкого круга задач изучения природных ресурсов на носителе должна стоять система, регистрирующая в видеоспектральном режиме весь оптический диапазон (0.4–13.0) мкм. Это или три видеоспектрометра: (0.4–1.0) мкм, (1.8–2.5) мкм и (8.0–13.0) мкм или многоспектральный оптико-механический сканер.

В заключение хотелось бы отметить и в какой то степени предотвратить имеющиеся разночтения в терминологии, которые всегда характерны для нового развивающегося метода. В зарубежной литературе [6] принят термин «imaging spectrometry», дословно переводящийся как «спектрометрия изображений, изображательная спектрометрия». Спектральная информация действительно может представляться также и в виде монохромных изображений, однако по-русски эти формулировки звучат несколько странно, поэтому термин видеоспектральная съёмка представляется оптимальным, тем более что и он, хотя и менее точно, отражает существо вопроса получения спектральной информации в виде изображения. Используемый в нашей стране термин «гиперспектральная аэросъёмка» неточен. Вместо термина «информационный параллелепипед» за рубежом используется термин «гиперкуб»; нам он также представляется неточным, так как по горизонтальной координате (линии полёта) он может быть сколь угодно большим и скорее подходит термин «гиперпараллелепипед». Не найдено в зарубежных публикациях понятие спектрального или полихроматического, хотя на срезах гиперкуба он имеется. Видеоспектральная съёмка в различных вариантах – космическом, авиационном полевом, лабораторном – за рубежом развивается быстрыми темпами благодаря наличию большого перечня видеоспектрометров различного назначения. Большое количество публикаций иллюстрируют соответствующие достижения. В нашей стране видеоспектральная съёмка находится на стадии становления из-за отсутствия серийных приборов. Проводится ограниченный объём исследований и опытно-методических работ. При небольших инвестициях в технику и методику можно ожидать быстрого развития метода.

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ, проект 16-29-09449.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. М.: Изд. МО СССР. 1986. 160 с.
2. Марков А.В., Шилин Б.В. Проблемы развития видеоспектральной аэросъёмки // Оптический журнал. 2009. Том 76. № 2. С. 20–27.
3. Алексеев А.А., Шилин Б.В., Шилин И.Б. Опыт полевых видеоспектральных исследований. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. №4. С. 89–94.
4. Шилин Б.В., Груздев В.Н., Алексеев А.А. Видеоспектральные исследования за рубежом // КОНТЕНАНТ, научно-технический журнал. 2013. Том 12, №1. С. 15–20.
5. Груздев В.Н., Красавцев В.М., Марков А.В., Чиков К.Н., Шилин Б.В. Действующие образцы видеоспектрометров для малого космического аппарата // Региональная экология. 2010. № 3 (29). С. 112–117.
6. Imaging spectrometry Van der Meer F.D., de Long S.M. (Eds.): Springer. 2006. 403 p.

**Газизов И.Ш.^{1,2*}, Зеневич С.Г.^{1,2}, Бендеров О.В.¹,
Спиридонов М.В.^{1,2,3}, Родин А.В.^{1,2}**

Разработка когерентного многоэлементного изображающего лидара ближнего ИК диапазона

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9
*E-mail: gazizov.ish@phystech.edu

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Россия, 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

В данной работе представлено описание концепта многоканального изображающего лидара для измерения спутного следа, образующегося при движении беспилотных летательных аппаратов. Характеристики лидара оценены на основе экспериментов с одним разработанным каналом, состоящим из фиксированной линии задержки и блока электроники на основе ПЛИС. Результатом данного проекта станет матричный приемник 8x2 для измерения расстояний и скорости ветра.

Ключевые слова: когерентный лидар, частотно-модулированный лидар, гетеродинирование, доплеровский сдвиг, скорость ветра.

**Iskander Sh. Gazizov^{1,2*}, Sergey G. Zenevich^{1,2}, Oleg V. Benderov¹,
Maxim V. Spiridonov^{1,2,3}, Alexander V. Rodin^{1,2}**

Development of a coherent near-infrared multi-element imaging lidar

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
Russia, 141701, Dolgoprudny, Institutskiy per, 9
*E-mail: gazizov.ish@phystech.edu

²Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI)
Russia, 117997, Moscow, Profsoyuznaya str, 84/32

³Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 11999, Moscow, Vavilova str, 38

This paper presents a description of a multi-channel imaging lidar concept for measuring vortices formed during the movement of unmanned aerial vehicles. The characteristics of the lidar were estimated based on experiments with one channel, consisting of a fixed delay line and an FPGA-based electronics unit. The outcome of this project will be an 8x2 matrix receiver for measuring distances and wind speed.

Keywords: frequency-modulated lidar, FMCW, heterodyne, Doppler shift, wind speed.

Введение

В настоящее время активно развивается тематика обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в городских условиях с помощью лидарных систем на основе детектирования параметров спутного следа, образующегося при движении БПЛА. Существенным недостатком работы коммерческих ветровых лидаров является длительное время измерений, связанное с необходимостью пространственного сканирования зондирующим лучом [1]. Решением данной проблемы может стать создание многоэлементного изображающего лидара, способного в результате единичного измерения получать пространственное распределение ветра по лучу зрения. Разработка подобных измерительных инструментов существенно расширит возможности оптической локации.

Существует два основных типа оптических лидаров: амплитудно- (AMCW) и частотно- (FMCW) модулированные. Основным отличием когерентных частотно-модулированных лидаров является возможность точного определения расстояния и скорости объектов, от которых отражается сигнал, а также отсутствие необходимости прецизионного измерения времени регистрации отраженного сигнала, что значительно упрощает требования к блоку приемной электроники. Также, система на основе гетеродинного смещения сигналов остается нечувствительной к паразитным источникам излучения, из-за чего влияние солнечной засветки объектива не влияет на качество измеряемого сигнала.

Ветровые лидары функционируют по принципу детектирования обратного рассеяния от отдельных частиц, либо от аэрозоля или молекул [2]. В случае детектирования лазерного луча, отраженного от отдельных частиц, расстояние зондирования ограничено десятками метров, в то время как детектирование отражения от множества частиц позволяет измерять скорость ветра на высотах до десятков километров [1]. Принцип работы упомянутого в работе лидара от NOAA заключается в гетеродинном приеме отраженного от аэрозолей импульсного излучения лазера для вычисления доплеровского смещения, вызванного движением частиц. Также существуют методы некогерентной регистрации малых частотных сдвигов на основе спектральных фильтров: частота лазера находится в области частоты среза фильтра, из-за чего небольшие вариации частоты лазера приводят к сильному изменению амплитуды сигнала [3].

Для перехода от точечных измерений к пространственным изображающим измерениям используется метод сканирования исследуемой области лучом лазера, что может занимать десятки минут и подходит для исследования лишь статических объектов. Использование многоканальных изображающих систем в лидарах позволяет сократить время сканирования для получения изображения, либо, в случае отказа от сканирования, получать изображение низкого разрешения в режиме реального времени. Одним из примеров подобных изображающих лидаров является когерентный восьмиканальный FMCW лидар, интегрированный на кристалле [4]. Благодаря развитию фотонных интегральных схем (PIC) возникла возможность объединения оптической и электронной частей лидара на одном чипе с обеспечением температурной и механической стабильности. На кристалле реализовано 8 излучающих и принимающих каналов на основе переключателей Маха-Цендера, а также калибровочный канал с фиксированной линией задержки. Авторами работы было достигнуто максимальное расстояние 60 м, при котором возможно измерение дистанции и скорости до движущегося объекта с разрешением 28 см и 30 см/с соответственно. Потенциальным недостатком упомянутой работы, в сравнении с разрабатываемой нами конфигурацией лидара, является последовательное переключение между каналами, что приводит к увеличению времени получения данных. Другим примером многоканальной системы является лидар с матрицей 4x4, которая реализована на кристалле [5]. Отличием данной работы от предыдущей является параллельное разбиение лазерного излучения на 16 каналов. Диапазон измерений составляет 50 см с разрешением 15 мкм.

С усовершенствованием КМОП матриц появилась возможность создания амплитудно-модулированных изображающих лидаров с разрешением до 500x500 пикселей, что на порядок превосходит разрешение частотно-модулированных изображающих лидаров [6]. Тем не менее, подобные устройства скорее служат для построения трехмерных карт местности, нежели измерения скоростей.

Для проведения точных измерений возникает необходимость стабилизации частоты лазера и контроля линейности частотной перестройки. В работе [7] описан один из возможных методов стабилизации частоты лазера на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с интерферометром Маха-Цендера и фиксированной линией задержки, который использует внешний электронный стандарт частоты для синхронизации. Разрешение определения расстояния ΔR зависит от оптической полосы B как $\Delta R = c/2B$, таким образом, для увеличения точности возникает потребность в увеличении частотной перестройки лазера, что влечет за собой необходимость более строгого контроля за линейностью перестройки частоты лазера [8]. Одним из методов контроля линейности перестройки частоты лазера является нахождение фазы биений, которая пропорциональна оптической частоте, с помощью преобразований Гильберта [9]. Таким образом, ток лазера необходимо перестраивать нелинейно для компенсации ошибок и достижения линейной перестройки оптической частоты. Разрешение можно увеличить иначе, так, многоэлементные лазеры позволяют расширить частотную полосу сканирования до 43 нм, что приводит к пространственному разрешению до 0.18 мкм на расстоянии 1.4 м с меньшими частотными шумами, чем у одного лазера с подобной оптической полосой [10].

Метод измерений

Целью данного проекта является объединение технологии FMCW лидаров для определения скорости ветра с концепцией многоканальности, которая стала возможной с развитием вычислительной техники, в частности, с разработками в области программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Описываемый лидар позволит в результате единичного измерения получать изображение поля скоростей в исследуемой области пространства. Достижение поставленной цели предполагает применение узкополосных диодных РОС лазеров и матрицы детекторов 8x2 для анализа гетеродинного сигнала с параллельной обработкой сигналов с каждого элемента детекторного массива. Анализ данных заключается в вычислении спектральной плотности гетеродинного сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье на ПЛИС одновременно для каждого пикселя, из чего далее определяется перемещение исследуемого объекта в режиме реального времени. В данной статье рассматривается замкнутая конфигурация лидара без детектирования рассеянного излучения, вместо этого разность оптических путей достигается с помощью линии задержки.

На рисунке 1 представлена схема инструмента в конфигурации, позволяющей наблюдать гетеродинный сигнал для тестирования алгоритмов. Диодный лазер накачивается треугольными импульсами тока в диапазоне 50–80 мА, из-за чего происходит треугольная перестройка частоты излучения в диапазоне ~ 0.2 см-1 с периодичностью 8 КГц. Далее лазерное излучение попадает в волоконный интерферометр Маха-Цендера, в одном из плеч которого установлена волоконная линия задержки длиной 15 м, после чего излучение смешивается на площадке p-i-n InGaAs фотодиода, где преобразуется в фототок. Из-за периодической перестройки частоты лазера, линия задержки приводит к тому, что на фотодиод падает излучение с различными частотами $f_1 = f_{laser}$, $f_2 = f_{laser} + df/dt * \tau$, где τ - время задержки. При попадании двух сигналов на фотодиод возникают биения на промежуточной частоте $f_{het} = f_2 - f_1$. Данный сигнал усиливается трансимпедансным усилителем, фильтруется полосовым фильтром в полосе 100 КГц - 20 МГц и снова усиливается, после чего оцифровывается 8 битным АЦП. Оцифрованный сигнал обрабатывается анализатором промежуточных частот (ПЧ), посредством вычисления быстрого преобразования Фурье. Отображение в реальном времени и расчет скорости, а также сохранение получаемых данных происходит на ПК.

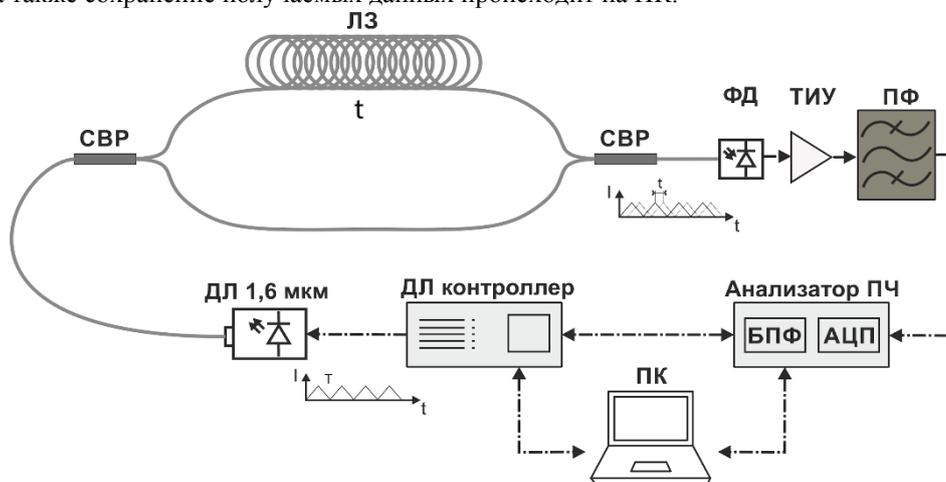


Рис. 1. Принципиальная схема одного канала многоканального изображающего лидара для отработки методики измерений. ЛЗ – линия задержки; ДЛ – диодный лазер; СВР – сварные волоконные разветвители; ФД – фотодиод; ТИУ – трансимпедансный усилитель; ПФ – полосовой фильтр; БПФ – быстрое преобразование Фурье; ПЧ – промежуточные частоты

Для лучшего представления о процессах, происходящих при смешении излучения, на рисунке 2(а) пунктиром представлена лоренцевская линия на промежуточной частоте $f_{het} \sim 3$ МГц (эта линия не соответствует оси частот), а также синтетические спектры лазерного излучения до и после линии задержки. Наблюдаемый гетеродинный сигнал представляет из себя свертку излучения лазера до и после линии задержки, что приводит к уширению линии в несколько раз. Момент начала оцифровки сигнала синхронизирован с лазерными импульсами так, чтобы считывать данные на восходящем и нисходящем фронтах треугольного импульса. В результате чего измеряются две частоты биений f_{down} и f_{up} , которые отвечают за положительную и отрицательную перестройку лазера и отличаются друг от друга лишь при наличии доплеровского сдвига.

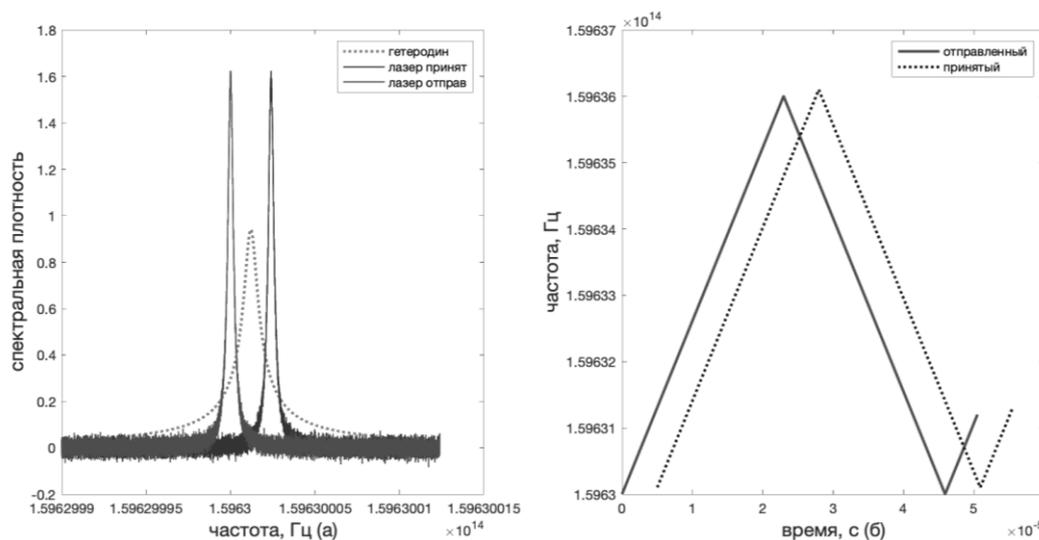


Рис. 2 (а) сплошные линии – спектры лазерного излучения до и после отражения от исследуемого объекта, пунктирная линия – гетеродинный сигнал; (б) схематично: сплошная линия – перестройка частоты лазера во времени, пунктирная линия - перестройка частоты лазера, отраженного от исследуемого объекта. Сигнал сдвигается вверх из-за эффекта Доплера и сдвигается вправо из-за линии задержки

Данная конфигурация лидара используется для проведения начальных тестов и отработки методики измерений, в дальнейшем она будет использоваться в качестве одного из каналов лидара для контроля линейности перестройки лазера по частоте. Если же вместо линии задержки использовать телескоп и оптический циркулятор, то данная схема будет функционировать в качестве измерительного канала. Отправленный и принятый сигнал схематично представлен на рисунке 2(б). Вычислительной мощности блока анализатора ПЧ в данной конфигурации прибора достаточно для одновременного приема информации с 8 каналов, с возможностью расширения до 16 каналов.

На данный момент ядро Фурье преобразования работает в “burst radix” режиме на частоте 100 МГц и выполняет преобразование 512 точек за 2700 тактов, что соответствует 27 мкс в режиме накопления данных. Ядро реализовано на базе HDL Coder и DSP System Toolbox от MATLAB. Исходя из описанного времени, необходимого для сбора и обработки сигнала, за один цикл перестройки частоты лазера можно обработать не более 2 спектров. Спектральное разрешение, обусловленное полосой и дискретностью Фурье преобразования, составляет 40 КГц, что соответствует 50 точкам на лоренцевский профиль линии лазера с полной шириной на полувысоте равной 2 МГц. Также исходя из этого можно рассчитать разрешение определения доплеровского смещения по формуле $\Delta f_{FFT\ precision} = \Delta v/c * f_{laser}$, откуда $\Delta v = 0.08$ м/с, если учесть возможность аппроксимации центра линии исходя из набора точек, точность можно повысить. Стоит заметить, что фазовые шумы лазера и неравномерность перестройки заметно ухудшают точность определения скорости, так как влияют на нестабильность частоты сигнала ПЧ. Точность определения расстояния можно рассчитать по формуле $\Delta R = c/2B = 0.025$ м, где $B = 6$ ГГц – оптическая полоса перестройки. В случае проведения измерений в режиме усреднений, число усреднений, при частоте кадров 25 Гц и периоде перестройки лазера 8 КГц, равно 640.

Расстояние и скорость изучаемого объекта можно найти по формулам [11]:

$$R = \frac{c}{4\gamma} (f_{up} + f_{down}) \quad (1)$$

$$v = \frac{\lambda}{2} (f_{down} - f_{up}). \quad (2)$$

где R – измеряемое расстояние, $\gamma = df/dt$ – скорость перестройки частоты лазера, f_{up} – частота на восходящем фронте треугольного импульса, f_{down} – частота на нисходящем фронте импульса, λ – длина волны лазера. Максимальное расстояние зондирования может быть ограничено не только мощностью лазера, но и максимальным сдвигом фаз между отправленными и принятыми треугольными импульсами $R_{max} < BW * c * T_{modul}/2B \sim 60$ м, где BW – полоса приемника, T_{modul} – период перестройки; а также

длиной когерентности $R_{coh} = c/(2\pi\Delta\nu) \sim 100$ м, где $\Delta\nu \sim 400$ КГц – ширина линии лазера. Тем не менее, существуют методы обхода данного ограничения [12, 13]. Исходя из полосы приемника равной 20 МГц, нами предполагается максимальное расстояние для проведения измерений порядка 50 метров.

Заключение

В работе описана концепция многоканального изображающего лидара для измерения скорости и расстояния до движущихся объектов, включая возможность определения скорости движения воздушных потоков от винтов БПЛА. Также приведены характеристики лидара на основе экспериментов, проведенных с одним из измерительных каналов. В настоящее время частотно-модулированные лидары интересны для решения задач оптической локации из-за широкого спектра возможностей, а благодаря развитию электроники становится возможным создание более сложных и миниатюрных систем. Дальнейшими планами по развитию проекта являются: проведение измерений с движущимися целями для оценки минимально возможного уровня определения скорости движущихся объектов с учетом шумовых характеристик, а также переход к многоканальной системе и получение изображений в режиме реального времени.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 19-32-90276 (Зеневич С.Г.)) и (№ 19-29-06104 (Родин А.В., Газизов И.Ш., Спиридонов М.В.)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar / Freeman F. Hall, R. Milton Huffaker, R. Michael Hardesty, M.E. Jackson, T. Rhidian Lawrence, Madison J. Post, R.A. Richter, and B.F. Weber // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. P. 2503–2506.
2. All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements / Christer J. Karlsson, Fredrik Å.A. Olsson, Dietmar Letalick, and Michael Harris // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. PP. 3716–3726.
3. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind / C. Laurence Korb, Bruce M. Gentry, and Chi Y. Weng // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. P. 4202–4213.
4. Photonic Integrated Circuit-Based FMCW Coherent LiDAR / A. Martin et al. // *Journal of Lightwave Technology*. 2018. V. 36. N. 19. P. 4640–4645.
5. Nanophotonic coherent imager / Firooz Aflatouni, Behrooz Abiri, Angad Rekhi, and Ali Hajmiri // *Opt. Express*. 2015. V. 23. P. 5117–5125.
6. A CMOS Time-of-Flight Range Image Sensor With Gates-on-Field-Oxide Structure // Kawahito, Shoji & Abdul Halin, Izhal & Ushinaga, Takeo & Sawada, Tomonari & Homma, Mitsuru & Maeda, Yasunari // *Sensors Journal*. 2007. V. 7. N. 12. P. 1578–1586.
7. Electronic-Photonic Integrated Circuit for 3D Microimaging / B. Behroozpour et al. // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2017. V. 52. N. 1. P. 161–172.
8. Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications / Peter A. Roos, Randy R. Reibel, Trenton Berg, Brant Kaylor, Zeb W. Barber, and Wm. Randall Babbitt // *Opt. Lett.* 2009. V. 34. P. 3692–3694.
9. Analysis of nonlinear frequency sweep in high-speed tunable laser sources using a self-homodyne measurement and Hilbert transformation / Tae-Jung Ahn and Dug Young Kim // *Appl. Opt.* 2007. V. 46. P. 2394–2400.
10. Multi-terahertz frequency sweeps for high-resolution, frequency-modulated continuous wave lidar using a distributed feedback laser array / Thomas DiLazaro and George Nehmetallah // *Opt. Express*. 25. 2017. V. 25. P. 2327–2340.
11. Kim, T. / Realization of Integrated Coherent LiDAR // UC Berkeley. 2019.
12. Frequency-modulated multifunction lidar for anemometry, range finding, and velocimetry–I Theory and signal processing / Feneyrou, P., Leviandier, L., Minet, J., Pillet, G., Martin, A., Dolfi, D., Midavaine, T. // *Applied Optics*. 2017. V. 56. N. 35. P. 9663.
13. Overcoming the Coherence Distance Barrier in Long-Range FMCW LIDAR / Kim, T., Bhargava, P., & Stojanović, V. // *Conference on Lasers and Electro-Optics*. 2018.

**Ивахов В.М.^{1*}, Парамонова Н.Н.¹, Привалов В.И.¹, Кароль И.Л.¹,
Киселев А.А.¹, Зинченко А.В.¹, Лаурила Т.², Аурела М.²,
Полищук В.Ю.³**

**Наблюдения потоков метана
на станциях Тикси (северная Якутия) и Новый Порт (п-ов Ямал)**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова», Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

*E-mail: ivakhoov@mail.ru

²Финский метеорологический институт
Финляндия, Хельсинки

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук»
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 10/3

Представлены результаты камерных измерений потоков метана летнего сезона 2019 г. в двух разных арктических экосистемах: (1) литоральной зоне Обской губы (Новый Порт) и (2) типичной тундре на севере Якутии (Тикси). Полученные значения потоков CH₄ варьируются в пределах от ~0 до 11,28 мг/м²/час и от -0,18 до 3,22 мг/м²/час в Новом Порту и Тикси соответственно. Диапазон значений хорошо согласуется с характерными значениями потоков CH₄ в аналогичных экосистемах.

Ключевые слова: потоки метана; литоральная зона; Обская губа; Новый Порт; Тикси; Арктика.

**Ivakhov V.M.^{1*}, Paramonova N.N.¹, Privalov V.I.¹, Karol I.L.¹, Kiselev A.A.¹,
Zinchenko A.V.¹, Laurila T.², Aurela M.², Polishchuk V.Yu.³**

**Observations of methane fluxes
at Tiksi (Northern Yakutia) and Novy Port (Yamal Peninsula) stations**

¹Voeikov main geophysical observatory

Russia, 194021, Saint-Petersburg, Karbyshev str., 7

*E-mail: ivakhoov@mail.ru

²Finnish Meteorological Institute
Finland, FI-00101, Helsinki, Erik Palménin aukio 1

³Institute of monitoring of climatic and ecological systems,
Siberian branch of the Russian academy of Science
Russia, 634055, Tomsk, Academicheskoy ave., 10/3

The results of methane fluxes chamber measurements of the summer season of 2019 in two different Arctic ecosystems are presented: (1) the littoral zone of the Gulf of Ob (Noviy Port) and (2) typical tundra in northern Yakutia (Tiksi). The obtained values of CH₄ fluxes vary from ~ 0 to 11,28 mg/m²/hour and from -0,18 to 3,22 mg/m²/hour in Noviy Port and Tiksi, respectively. The range of values agrees well with the characteristic values of CH₄ fluxes of similar ecosystems.

Keywords: methane fluxes; littoral zone; Gulf of Ob; Noviy Port; Tiksi; Arctic.

Скорость современного роста глобальной температуры, вызванного в основном увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, составила около 0,17 °C / 10 лет. Температура на территории России растет значительно быстрее – 0,45 °C за 10 лет, и особенно быстро в Арктике, где скорость роста достигает 0,8 °C за 10 лет [2]. Как следствие, увеличивается период положительных температур воздуха, что приводит к изменению естественных процессов эмиссии/поглощения метана в/из атмосферы арктическими экосистемами. Метан является вторым по значимости долгоживущим антропогенным

парниковым газом. Основными природными источниками поступления CH_4 в атмосферу в Арктике являются увлажненные территории тундры, озера, устья рек, а также шельф Северного Ледовитого океана.

Фундаментальной проблемой при исследовании потоков метана в системе «биосфера — атмосфера» с различных типов подстилающей поверхности является высокая неоднородность и многообразие источников и стоков CH_4 . Тундра является ярким примером поверхности с неоднородными биогеохимическими процессами. Растительность, почва, геоморфологическая структура в значительной степени фрагментированы [17]. Эмиссия метана из тундры составляет около 3% от глобальной эмиссии CH_4 , оцениваемой на уровне 560 тг/год, 40% из которой имеют биогенное происхождение [12, 15]. Прогнозируется, что выбросы из тундры существенно возрастут, т. к. часть обширного резервуара органического углерода в почвах многолетнемерзлых грунтов может попасть в атмосферу в результате потепления [16].

Неоднородность потока метана в системе биосфера-атмосфера обусловлена множеством биохимических и физических факторов: продуцированием и окислением CH_4 , механизмами переноса CH_4 [8]. Метан попадает в атмосферу через процессы диффузии в грунте и воде, а в водных экосистемах также посредством пузырькового механизма и через стебли растений. Динамика этих процессов переноса различна, что в свою очередь влияет на долю окисленного метана. К наиболее значимым факторам окружающей среды, оказывающим влияние на потоки, относятся температура и влажность почвы (или уровень грунтовых вод) [13]. Как правило, влажные почвы с высоким содержанием углерода выделяют значительное количество метана, а сухие почвы выступают как слабые стоки. Если в регионе преобладают сухие почвы, то сток может преобладать над источником [10]. Поток метана сильно зависит от состава и количества растительности и параметров почвы. Например, сосудистые растения с аэренхимой в значительной степени влияют на газообмен водных экосистем с атмосферой. К важным характеристикам почвы, определяющим величину потока, относятся: количество субстрата, кислотность и окислительно-восстановительный потенциал [11, 13]. В водных экосистемах, наряду с вышеперечисленными характеристиками, важными параметрами газообмена, являются глубина и гидрологический режим водоема [9].

В настоящей работе представлены результаты измерений потоков метана в различных арктических экосистемах: в литоральной зоне Обской губы в районе станции Новый Порт и на типичном для северной Якутии участке тундры (Тикси).

Место и средства измерений

Село Новый Порт расположено в тундровой зоне, подзоне южных кустарниковых тундр, в Южно-Ямальском округе ерниковых моховых тундр в сочетании с лишайниковыми тундрами и болотами. На водоразделах присутствуют заболоченные тундры с мощностью торфа 20—50 см. Болота, в основном низинные, встречаются только по хасыреям, поймам рек и ложбинам стока временных водотоков. Самые крупные массивы гипновых и сфагновых болот представлены в заболоченной, с многочисленными протоками и озерами, лайдовой зоне Обской губы [7].

К характерным особенностям геоморфологии береговой зоны Обской губы относятся широкое развитие аккумулятивных ветровых осушек, достигающих в отдельных местах ширины до 1 км [3]. В период наблюдений атмосферной концентрации метана уровень воды в Новопортовской бухте варьировался в пределах от 5 до 150 см, что соответствовало вариациям ширины осушки литоральной зоны от ~300 до 0 м соответственно.

Гидрометеорологическая обсерватория (ГМО) «Тикси» (71°36' с. ш., 128°53' в. д., 30 м над уровнем моря) находится в 500 м к западу от побережья моря Лаптевых, в 5 км к ЮЮВ от одноименного поселка и в 1,5 км к северу от метеостанции. Растительный покров является типичным для арктической тундры и в основном состоит из мхов, лишайников, осок и кустарничков. Здание обсерватории находится на краю небольшой долины, окруженной каменистыми холмами из сланцевой щебенки. Средняя температура воздуха самого холодного (января) и теплого (августа) месяцев составляет -32,2 и 7,8 °С, соответственно [14]. Зимний период с отрицательными температурами наступает в конце сентября – начале октября и заканчивается в конце мая – начале июня, при этом в летний период возможны заморозки. Средняя скорость ветра в течение года варьируется в пределах от 4,0 до 6,1 м/с. В холодный сезон преобладают ветры юго-западных направлений, а в теплый сезон – ветры северо-восточных направлений [4].

В Тикси измерения потоков метана проводились методом статичных камер, состоящих из двух частей: непосредственно самой камеры из оргстекла размером 0,5 × 0,5 × 0,25 м и металлического

основания аналогичного размера. К камере был подключен оптический газоанализатор DLT-100 (LGR), который с частотой 1 Гц определял концентрацию метана в камере. По изменению концентрации CH_4 в замкнутом объеме определялся поток (плотность потока). Время эксперимента, как правило, составляло не более 10 минут.

Измерения потоков в литоральной зоне Обской губы выполнялись с помощью плавающих камер на водной поверхности (глубины до 1 м) и статичных камер в зоне осушки. Концентрация CH_4 в камере определялась посредством лабораторного анализа проб воздуха, последовательно отобранных из камеры при помощи шприца с интервалом 10-15 минут. В лаборатории анализ выполнялся на газовом хроматографе «Кристалл 5000» с пламенно-ионизационным детектором по методике [6].

Результаты

Наблюдения потоков метана в районе ГМО «Тикси» проводились 1 сентября 2019 г. в солнечную погоду при температуре воздуха и температуре грунта на глубине 5 см $\sim 10^\circ\text{C}$ и $\sim 5^\circ\text{C}$ соответственно. Одиннадцать участков размером $0,5 \times 0,5$ м были разбиты на три категории: каменистая тундра (сланцевая щебенка), влажная тундра с растительностью и открытой водной поверхностью, сухая тундра с растительностью. Значения измеренных потоков CH_4 варьировались в пределах от $-0,18$ до $3,22$ $\text{мг/м}^2/\text{час}$. На участке со сланцевой щебенкой было получено отрицательное значение потока метана $-0,18$ $\text{мг/м}^2/\text{час}$. Для данного типа подстилающей поверхности это характерное значение и оно на $0,02$ меньше, чем минимальный поток, зафиксированный в предыдущих полевых кампаниях [5]. Максимальные потоки и наибольшая изменчивость наблюдались на влажных участках тундры с растительным покровом и открытой водной поверхностью. Средняя величина потока CH_4 по результатам измерений на 9 участках составила $1,15 \pm 1,07$ $\text{мг/м}^2/\text{час}$, что практически в два раза меньше, чем среднее значение потока для той же категории, полученное по результатам наблюдений в 2013–2014 гг., когда максимальные значения потоков достигали $5,76$ $\text{мг/м}^2/\text{час}$. На засушливом участке тундры с растительным покровом был зафиксирован поток величиной $0,14$ $\text{мг/м}^2/\text{час}$, что практически совпало с максимальным значением потока ($0,18$ $\text{мг/м}^2/\text{час}$) на том же месте, полученное пятью годами ранее. Характерные примеры роста концентрации метана в камерах и полученные на их основе значения потоков по результатам измерений в Тикси показаны на рисунке 1.

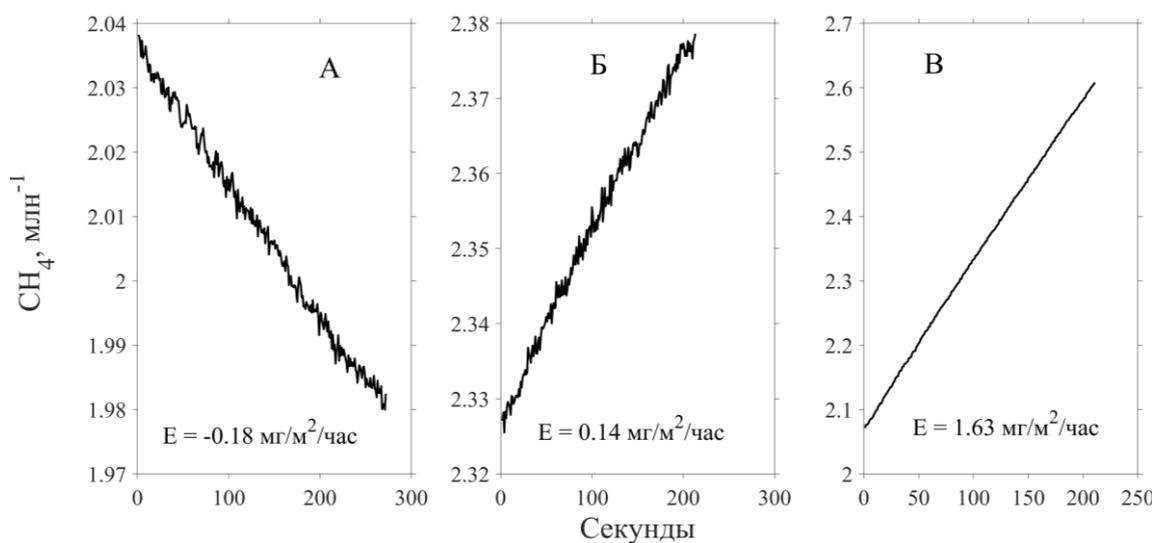


Рис. 1. Изменение концентрации CH_4 в камере на: А — каменистом участке, Б — участок сухой тундры, В — участок влажной тундры

В Новом Порту ведутся регулярные долгосрочные наблюдения атмосферной концентрации метана и диоксида углерода. Превышение концентрации CH_4 над фоном за счет влияния региональных источников варьируется в пределах 150 млрд^{-1} , достигая максимальных значений в зимние месяцы [1]. Чтобы установить причины столь большой изменчивости концентрации метана, в июле-августе 2019 г. были проведены полевые исследования потоков CH_4 в литоральной зоне Обской губы, которая может являться крупным естественным источником CH_4 . В результате пилотных наблюдений были получены значения потоков метана в 11 точках на побережье Новопортовской бухты. Значения потоков CH_4 варьировались в пределах от -0.85 до 11.28 $\text{мг/м}^2/\text{ч}$ в зависимости от места наблюдения. Среди факторов

окружающей среды, влияющих на поток метана, ключевым является содержание органического материала в донном грунте. В ходе серии камерных экспериментов 11 августа 2019 г. в одном месте при разных уровнях воды было установлено, что изменение уровня воды за шесть часов с 60 см до 30 см привело к изменению потока CH_4 примерно в два раза с 0,32 до 0,18 $\text{мг/м}^2/\text{ч}$.

Одним из факторов, влияющих на величину потоков в литоральной зоне Обской губы, являются колебания уровня воды. Для оценки площади прибрежной акватории, в наибольшей степени подверженной влиянию данного фактора, были проанализированы снимки Landsat и карты генштаба СССР. Площадь наиболее «чувствительной» зоны ограничивалась береговой линией и изобатой 8 м. Для тестового участка в районе Нового Порта с длиной береговой линии 17 км на основе снимка от 26.09.2015 была получена оценка площади осушки — около 9 км^2 .

Выводы

Полученные результаты в ходе полевой кампании летнего сезона 2019 года по измерению потоков метана камерным методом в Тикси хорошо согласуются с результатами измерений 2013-2014 гг.

Впервые проведены наблюдения потоков метана в литоральной зоне Обской губы, как в зоне осушки, так и на глубинах до 1 м. Величина потоков метана (до $\sim 10 \text{ мг/м}^2/\text{час}$) находится в диапазоне значений, характерных для озер арктического региона. Мелководная литоральная зона является благоприятной средой обитания для метанотрофных бактерий, которые имеют, с одной стороны, подпитку в виде метана, выделяемого из донного грунта, и, с другой стороны, необходимое количество кислорода для его усвоения. Показано, что колебания уровня воды в Обской губе приводят к изменениям в эмиссии метана (с увеличением глубины уменьшается поток CH_4). Наиболее ярко данный эффект наблюдается на малых глубинах, где вариации уровня воды составляют десятки процентов.

Проведение натурных измерений потоков метана в различных арктических экосистемах является важным вкладом в понимание современного состояния эмиссии CH_4 и оценки ее отклика на изменения климата. Необходимо дальнейшее пополнение базы данных измерений потоков метана в арктическом регионе для совершенствования методов оценки природной эмиссии метана с больших территорий

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-05-00982. Авторы выражают благодарность ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» и ООО «Фертонг» за данные наблюдений за уровнем воды в Новом Порту. Также авторы крайне признательны студенту СПбГУ Абакумову А. А. за помощь в проведении экспедиционных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисова В.И. [и др.]. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации в 2018 году, 2019.
2. Акентьева Е.М. [и др.]. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2017.
3. Ефрекин И.М. [и др.]. Современное океанологическое и экогеологическое состояние Обской губы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2009. (3).
4. Иванов Н.Е. [и др.]. Многолетняя изменчивость характеристик климата района гидрометеорологической обсерватории Тикси // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1(81). С. 24–41.
5. Ивахов В.М. [и др.]. Результаты первых камерных измерений потоков метана на гидрометеорологической обсерватории «Тикси» // Труды Главной геофизической обсерватории. 2015. № 576. С. 27–41.
6. Парамонова Н.Н., Привалов В.И. Методика измерений методом газовой хроматографии РД 52.04875-2019. Молярная доля метана и диоксида углерода в пробах атмосферного воздуха / (в печати), 2020.
7. Хозяинова Н.В., Цибарт И.Н. Флора и растительность южных тундр района пос. Новый Порт (полуостров Ямал) // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2007. (7).
8. Bridgham S.D. [et al.]. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales // Global Change Biology. 2013. № 5 (19). P. 1325–1346.
9. Chen X., Slater L. Methane emission through ebullition from an estuarine mudflat: 1. A conceptual model to explain tidal forcing based on effective stress changes // Water Resources Research. № 6 (52). P. 4469–4485.

10. D'Imperio L. [et al.]. Methane oxidation in contrasting soil types: responses to experimental warming with implication for landscape-integrated CH₄ budget // *Global Change Biology*. 2017. № 2 (23). P. 966–976.
11. Lai D.Y.F. Methane Dynamics in Northern Peatlands: A Review // *Pedosphere*. 2009. № 4 (19). P. 409–421.
12. McGuire A.D. [et al.]. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions // *Biogeosciences*. 2012. № 8 (9). P. 3185–3204.
13. Olefeldt D. [et al.]. Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zones // *Global Change Biology*. 2013. № 2 (19). P. 589–603.
14. Pogodaiklimat Погода и климат [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/21824.htm> (дата обращения: 21.01.2019).
15. Saunio M. [et al.]. The growing role of methane in anthropogenic climate change // *Environmental Research Letters*. 2016. № 12 (11). P. 120207.
16. Schuur E.A.G. [et al.]. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. № 7546 (520). P. 171–179.
17. Virtanen T., Ek M. The fragmented nature of tundra landscape // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. (27). P. 4–12.

**Lin Changqing¹, Labzovskii Lev D.^{2*}, Leung Mak Hugo Wai³,
Fung Jimmy C.H.^{1,4}, Lau Alexis K.H.^{1,5}, Kenea Samuel Takele², Bilal
Muhhamad⁶, Vande Hey, Joshua D.⁷, Lu Xingcheng¹, Ma Jun⁵**

**Observation of PM_{2.5} using a combination of satellite remote sensing and
low-cost sensor network in Krasnoyarsk with limited reference monitoring**

¹Division of Environment and Sustainability, The Hong Kong University of Science and Technology,
Hong Kong, China

²R&D Satellite and Observations Group, Netherlands Meteorological Institute (KNMI),
De Bilt, Netherlands

*E-mail: labzowsky@gmail.com

³Faculty of Engineering, The Chinese University of Hong Kong
Hong Kong, China

⁴Department of Mathematics, Hong Kong University of Science and Technology
Hong Kong, China

⁵Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology,
Hong Kong, China

⁶School of Marine Science, Nanjing University of Information Science and Technology
Nanjing 210044, China

⁷School of Physics and Astronomy, Earth Observation Science Group, University of Leicester,
Leicester, United Kingdom

The lack of reference ground-based PM_{2.5} observation leads to large gaps in air quality information, particularly in many areas of the developing world. This study investigated a new solution for urban air-quality monitoring in regions with limited reference ground-based monitoring. We developed an observation-based method by combining satellite remote-sensing techniques and a newly established low-cost sensor network to estimate long-term PM_{2.5} concentrations over Krasnoyarsk, a highly industrialized Siberian city. First, a physical model was developed to estimate PM_{2.5} concentrations using satellite remote-sensing with the aid of ground-based meteorological and radiosonde observations. Observations from the ground-based sensor network were then used to calibrate the deviations in the satellite-derived PM_{2.5} concentrations. The results show that the satellite-based PM_{2.5} concentrations obtained by our physical model were in good agreement with the sensor observations ($R = 0.78$ on the monthly scale). The deviation in satellite-derived annual PM_{2.5} concentrations resulted from data restrictions that occurred at noon and data loss in winter were identified as 20% and 30%, respectively. The regional transport of smoke from forest wildfires increased PM_{2.5} concentration to 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the summer 2018. The average PM_{2.5} concentrations in the urban districts could reach 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which far exceeded the World Health Organization air quality guideline. These results underscore the good ability of our new method to determine PM_{2.5} concentrations in regions with limited reference ground-based monitoring. Use of sensor and meteorological observations greatly improved satellite detection of PM_{2.5} concentration. In addition, our method has the potential for global application to improve determination of PM_{2.5} concentrations, especially in sparsely monitored regions.

Keywords: Satellite; PM_{2.5}; Low-cost sensor; Siberia; Air quality.

Introduction

Given the adverse effects of fine particulate matter (PM_{2.5}) on human health, PM_{2.5} concentrations should be accurately monitored. PM_{2.5} concentrations have traditionally been monitored by ground-based networks operated by government agencies. However, such networks often fail to provide sufficient observational coverage for urban air quality monitoring. Using satellite-detected and low-cost sensor-based aerosol optical depth (AOD) to estimate PM_{2.5} concentration is an effective tool to fill the data gaps in government-led ground-based observations [1, 2]. The estimation requires an understanding of the vertical distribution, hygroscopic growth, and

characteristics of aerosols [3]. Satellite-based estimations of $PM_{2.5}$ concentrations in these poorly-monitored regions have to rely on chemical transport models (CTMs) to simulate AOD- $PM_{2.5}$ relationships [4]. Each model-driven computation is subject to certain intrinsic uncertainties, such as those arise from aerosol vertical distribution and optical properties [5, 6]. It is therefore important to develop alternative observation-based AOD- $PM_{2.5}$ algorithms for estimation of $PM_{2.5}$ such as low-cost sensor devices with sufficient sensitivity for air quality monitoring [7, 8]. Although $PM_{2.5}$ datasets with limited accuracy may be obtained from only a single sensor [9, 10], the integration of large numbers of sensors into a network can yield useful and realistic information about a city's air quality [11].

When urban air quality measurements are severely lacking, the efforts of non-governmental urban air-quality monitoring can encourage citizen action by informing broad audiences about a city's air quality. Such a situation has already developed in Krasnoyarsk, the city susceptible to air quality deterioration due to numerous urban emission sources from chemical and metallurgical industries, coal-burning power plants, and transportation [12]. Moreover, the region around Krasnoyarsk frequently experiences summer wildfires [13], which leads to a reduction in ground visibility and cause long-term episodes of air pollution in the city [14]. Public concern about air quality has evolved rapidly in recent years seemingly due to increase in the number of people with pulmonary disease [15]. To provide more local, accessible data, an unofficial $PM_{2.5}$ monitoring network named "Nebo" ("sky" in Russian) was founded in Krasnoyarsk. The numerous low-cost sensors in this network have rapidly covered the city's entire urban area; measurements have been collected since 2017, and the data have been periodically released for public access.

This study used Krasnoyarsk as a case study for alternative solutions in urban air-quality monitoring in regions with poor reference monitoring. We used satellite remote-sensing and newly developed ground-based low-cost sensors (the Nebo sensor network) to measure the $PM_{2.5}$ concentrations in Krasnoyarsk. Here we analyzed the agreement of low-cost sensors with available reference observations to determine the validity of the sensor measurements. By applying an observation-based method to estimate the distribution of $PM_{2.5}$ concentration, we characterized $PM_{2.5}$ variation in Krasnoyarsk during a 2-year period (2017 to 2018), including the anomalous pollution events. Finally, we evaluated the method's performance, uncertainty, and long-term applicability.

Data and methods

Study region and measurement sites

Figure 1 shows the topography of the study region around Krasnoyarsk (92.55°E to 93.15°E, 55.7°N to 56.3°N). Krasnoyarsk is on the Yenisei river in Siberia, Russia, and is surrounded by forested mountains to the south and west and by plains to the north and east. On Figure 1 white points represent measurements within the ground-based $PM_{2.5}$ sensor network, red square represents the ground meteorological station for visibility and relative humidity measurements, yellow triangle represents the radiosonde station, and orange triangle represents the $PM_{2.5}$ reference monitoring station.

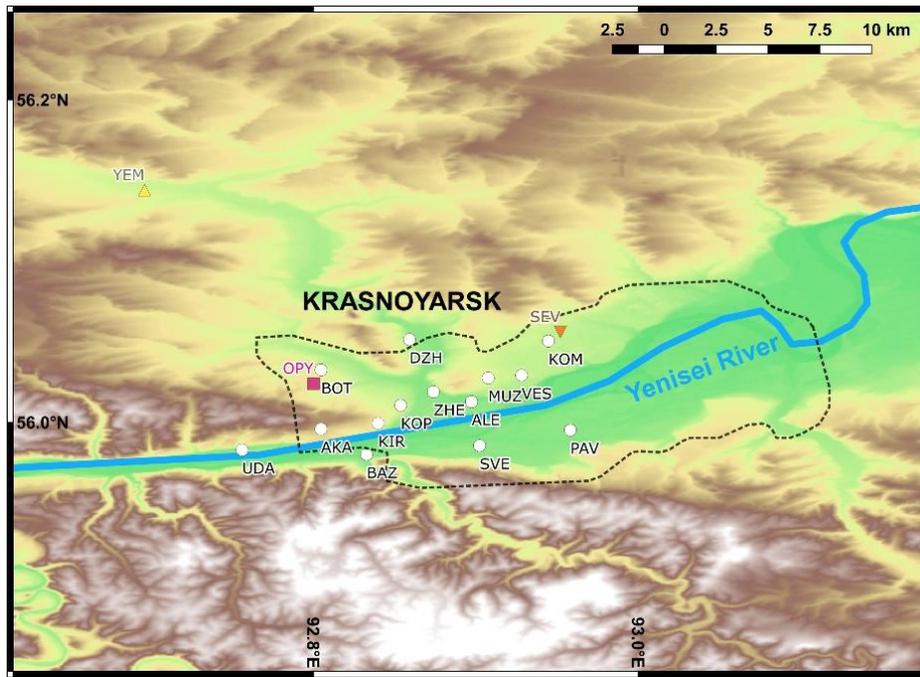


Figure 1. Topography of the study region around Krasnoyarsk

Data and methods. PM_{2.5} concentration and meteorological data

Reference PM_{2.5} concentration was measured using the β -attenuation monitor (BAM) at Severniy (SEV, 56.07°N and 92.94°E) station in February 2018. Its location is shown by the orange triangle in Figure 1. The BAM analyzer is manufactured by MetOne Instruments. The establishment of the alternative air quality monitoring (“Nebo”) continues in Krasnoyarsk. The network uses identical units of the AirVisual Node to measure PM_{2.5} concentration. The operation of the AirVisual Node is based on the common light-scattering principle [16]. Independent laboratory evaluation of AirVisual sensors using DustTrak has also confirmed that these units reliably and realistically quantify PM_{2.5} and all sensors were delivered to the network installation team after the laboratory calibration was conducted by the manufacturer. The Nebo network has introduced 14 stations for PM_{2.5} monitoring, as indicated by white points in Figure 1 and we used the observations from 11 stations (which by January 2019 had accumulated data for more than 6 months).

Planetary boundary layer height (PBLH), Common methods for deriving PBLH have used vertical profiles of meteorological quantities [17, 18]. We acquired the radiosonde data from Yemelyanovo (YEM, 56.18°N and 92.62°E) station in Krasnoyarsk from the World Meteorological Organization’s global telecommunications. We adopted the method proposed by Holzworth [19, 20] 1964, 1967) to produce diurnal variation in the PBLH at an interval of 1 hour. Hourly surface meteorological parameters, such as relative humidity (RH) and visibility (L), at Opytnoe Pole (OPY, 56.03°N and 92.75°E, red square in Figure 1) were also acquired from the World Meteorological Organization. Additionally, we exploited the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model to track the origin of air masses in Krasnoyarsk [21].

We also used the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) instruments aboard Terra and Aqua measure AOD [20]. The AOD data were retrieved using the dark-target algorithm over land [21]. The algorithm introduces aerosol scale height (H), integrated humidity coefficient (γ'), and integrated reference value under dry-air conditions (K). The scale height H can be estimated from the ratio of the satellite-based AOD and the visibility-derived $\sigma_{a,0}$. Similar to most other regions, the visibility dataset was affected by an upper limit of 10 km in Krasnoyarsk. The PBLH provided additional information to characterize the aerosol vertical distribution. The scale height can be larger than PBLH when a significant concentration of aerosols accumulates above the PBL. We therefore introduce a ratio (A) of scale height to the PBLH. Spatial distribution of the PM_{2.5} concentration can be estimated as follow:

$$PM_{2.5} = \frac{\frac{AOD}{A \cdot PBLH}}{K \cdot \left(\frac{1-RH}{1-RH_0}\right)^{-\gamma'}} \quad (1)$$

The γ' and K values are prerequisite parameters in our PM_{2.5} estimation model, and both are associated with aerosol characteristics [24]. In the monitoring-limited regions, assumptions of both γ' and K values are

required. In this work, we began the estimate of PM_{2.5} concentration in Krasnoyarsk based on the average γ' and K values derived from the Chinese study [25].

Results and discussion

Evaluation of ground-based sensor observations

Figure 2 (left panel) shows regression relationship between hourly PM_{2.5} concentrations from the sensor and reference BAM monitoring. We identified good agreement between them (slope = 0.95, intercept = 0.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $R = 0.94$, $N = 672$). The monthly average PM_{2.5} concentration from the sensor and BAM were 55.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 57.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The systematic deviation in the monthly average PM_{2.5} concentration was -2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which was insignificant ($< 5\%$). Such high agreement also outperformed the experiment conducted by the AirVisual group in Beijing, was as high as that of the previous dataset from Xian, China ($R = 0.93\text{--}0.95$) [26] and higher than in the Oakland, California ($R = 0.80\text{--}0.84$) [27]. Figure 2 (right panel) shows the correlation coefficient ($R = 0.45 - 0.89$, mean = 0.72) between hourly PM_{2.5} concentrations for each pair of stations during the second half year of 2018 (i.e., from July to December). The lowest R values were associated with PM_{2.5} concentration at AKA (the westernmost side of the city). The larger distances between AKA station and other stations could lead to these lower correlation coefficients. Temporal variation in PM_{2.5} concentrations at AKA and its neighboring stations (e.g., BAZ and KIR stations), however, was highly consistent with a correlation coefficient exceeded 0.8. These results suggest the good performance of all sensors from the network.

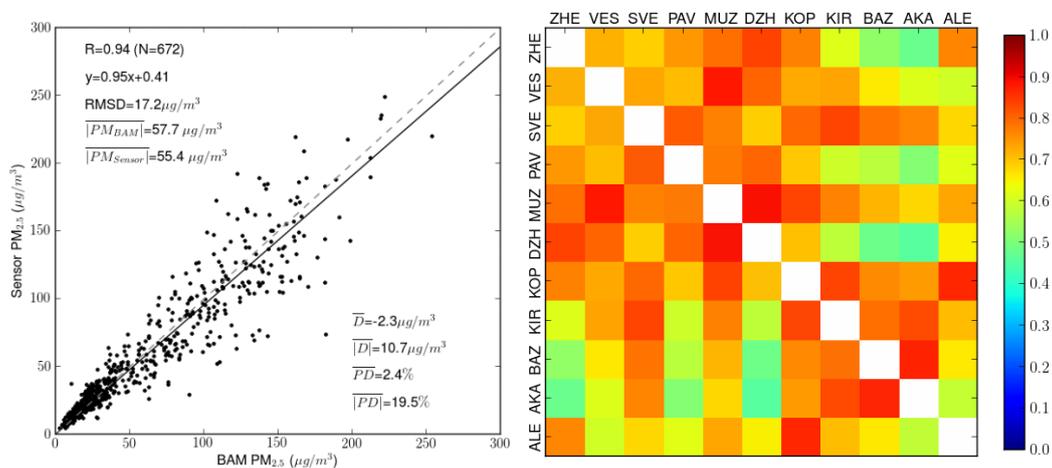


Figure 2. Left panel: regression relationship between hourly PM_{2.5} concentrations from the sensor at KOM station and the reference BAM monitoring data from SEV in February 2018. Statistical metrics: correlation coefficient (R), root-mean-square deviation (RMSD), mean deviation (\overline{D}), mean absolute deviation ($|\overline{D}|$), mean percentage deviation (\overline{PD}), and mean absolute percentage deviation ($|\overline{PD}|$). Right panel: Correlation coefficient between hourly PM_{2.5} concentrations for each pair of stations during July to December of 2018

Retrieving PBLH and scale height

To define the vertical mixing within our method of PM_{2.5} data retrieval, we plotted the time series of the noontime average PBLH (11:00 AM - 2:00 PM) at the radiosonde station (2017 – 2018) and found that the noontime PBLHs in spring and summer were higher than those in autumn and winter. The scale height H was estimated from the ratio of the satellite-based AOD and the visibility-derived $\sigma_{a,0}$. The red triangles show the noontime scale height at the meteorological station on specific dates, when satellite observations were available and the ground visibility was within the upper limit (i.e., 10 km). The seasonal average ratio (A) of the scale height to PBLH for spring (MAM), summer (JJA), and autumn (SON) were estimated to be 0.99 ± 0.52 , 1.70 ± 0.62 , and 0.99 ± 0.37 , respectively. The high ratio in summer suggests that approximately 40% of aerosols appeared above the PBL, which resulted from the vertical convection and regional transport of aerosols such as wildfire smoke.

Comparison between satellite-based and ground-based PM_{2.5} concentrations

We applied our method to estimate PM_{2.5} concentrations using satellite data, coupled with radiosonde and ground meteorological observations. The satellite-based estimation of PM_{2.5} concentration used average values of γ' and K obtained from China (i.e., 0.50 and 5.14 m^2/g) [25]. We compared the agreement in PM_{2.5} concentrations between satellite and Nebo sensor observations. Thus, Figure 3 shows correlation coefficients between the

satellite-derived and ground-based daily noontime $PM_{2.5}$ concentrations during the study period. The correlation coefficients ranged from 0.36 at PAV station to 0.87 at AKA station (mean, 0.57 ± 0.14). These correlation coefficients were comparable to those from the eastern United States ($R = 0.30 - 0.80$) and higher than those from the western United States ($R < 0.30$) obtained with the CTM-based model [5]. Our results suggest that the observation-based model predicted the temporal variations in $PM_{2.5}$ concentration as accurately as the simulation-based model.

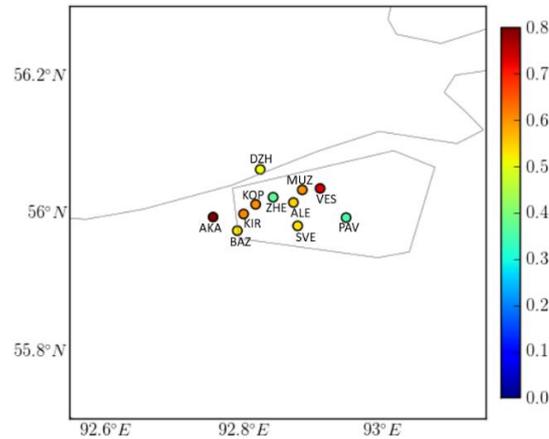


Figure 3. Correlation coefficient between satellite-derived and ground-observed daily noontime $PM_{2.5}$ concentrations from various sensors during the study period

On average, the satellite-derived $PM_{2.5}$ concentrations were overestimated by $5.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (i.e., 27.6% of sensor observations). It may indicate that Krasnoyarsk experiences high average loading of carbonaceous aerosols (e.g., elemental and organic carbons) [28]. The K value in Krasnoyarsk is thus expected to be higher than that in China because of the strong light extinction efficiency of the carbonaceous aerosols [29]. Therefore, we made an assumption and used a higher K value of $6.56 \text{ m}^2/\text{g}$ for the Krasnoyarsk data, 27.6% higher than the average value in China. This eliminated the systematic error within the satellite-derived data but did not affect the correlation coefficient between the satellite-derived and sensor-observed daily $PM_{2.5}$ concentrations. Figure 4 compares the satellite-derived and ground-observed daily noontime $PM_{2.5}$ concentrations from the sensor at SVE station, which has the longest data record (i.e., measurements started in June 2017). In this figure, the blue points on both panels show the time series of the ground-observed daily noontime $PM_{2.5}$ concentration from 2017 to 2018, and the red points show the time series of the satellite-derived daily noontime AOD and $PM_{2.5}$ concentrations, respectively. Notably, after the conversion from AOD to $PM_{2.5}$ concentration, the correlation coefficient increased from 0.51 to 0.54 ($N = 78$) during the study period. In particular, the correlation coefficient substantially increased from 0.09 to 0.67 ($N = 24$) in 2017.

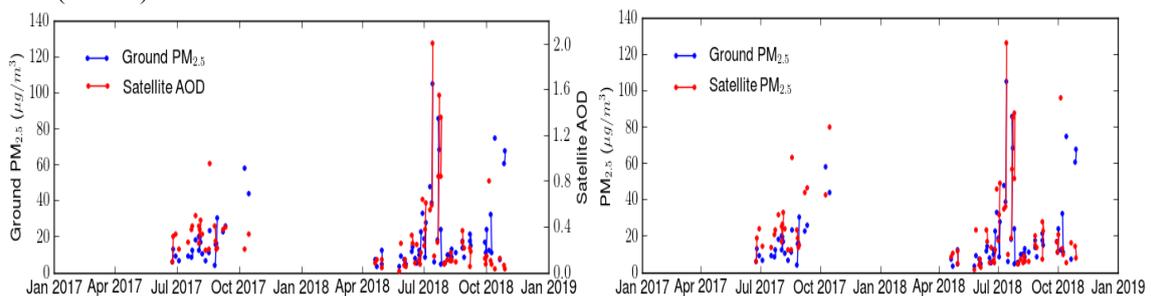


Figure 4. Comparison of satellite-derived and ground-observed daily noontime $PM_{2.5}$ concentrations from the sensor at SVE station from 2017 to 2018. Blue points in (a – left panel) and (b – right panel) show the time series of the ground-observed daily noontime $PM_{2.5}$ concentrations. Red points in (a) and (b) show the time series of the satellite-derived daily noontime AOD and $PM_{2.5}$ concentrations, respectively

Characterization of $PM_{2.5}$ concentration variation

We combined Nebo monitoring observations and spaceborne data to characterize $PM_{2.5}$ concentration variations in Krasnoyarsk in 2017-2018 and during the anomalous pollution events. The highest $PM_{2.5}$ concentrations ($>200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) were frequently observed in January and February and in July 2018. The high $PM_{2.5}$ concentrations in winter were seemingly driven by enhanced emissions from heating systems and by weather conditions that were unfavorable for pollution dispersion [30]. The diurnal variation in $PM_{2.5}$ concentration from

the sensor observations showed that the $PM_{2.5}$ concentration reached its peak at 2:00 pm. We discovered that the noontime average $PM_{2.5}$ concentration was higher than the 24-h average by $5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (i.e., 20.0% of the 24-h average). Because satellite observations were only available at approximately noon, a correction factor was needed to represent the degree of diurnal $PM_{2.5}$ (for long-term averages). To obtain the monthly average $PM_{2.5}$ concentration, we applied a correction factor of 1.20 to the satellite-derived monthly average of noontime $PM_{2.5}$ concentrations. This correction factor was essential because the use of satellite-derived $PM_{2.5}$ concentrations mainly focused on the use of long-term averages. We found high correlation between satellite-derived monthly average $PM_{2.5}$ concentrations against ground-based observations from all sensors during 2017 and 2018 period ($R = 0.78$, $N = 74$). The root-mean-square deviation, mean deviation, and mean percentage deviation were estimated to be $7.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and 18.1%, respectively (the application of the constant correction factor does not affect the R). We identified the spatial distribution of the $PM_{2.5}$ concentrations in Krasnoyarsk by plotting the satellite-derived averages from 2017, 2018, and 2017–2018 (shown in left, middle, and right panels of Figure 5, respectively). The points in the middle panel represent the annual average $PM_{2.5}$ concentrations from the four sensors with full data coverage in 2018. The mean deviation of the annual averaged $PM_{2.5}$ concentrations from satellite and sensor observations was $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (i.e., 5.3% of sensor observation). Satellite observations show that the highest $PM_{2.5}$ concentrations were present over the geographical center and the southern coast of the city in 2017 and 2018 period. In this area, the $PM_{2.5}$ concentrations ranged from $29.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Central district) to $35.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Sverdlovskiy District) in 2017. In 2018, the same area had $PM_{2.5}$ concentrations ranging from $24.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Central district) to $33.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Sverdlovskiy District). Therefore, the 2-year average $PM_{2.5}$ concentrations in the central and southern districts of Krasnoyarsk could reach $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which far exceeds the World Health Organization (WHO) Air Quality Guideline (AQG) for annual $PM_{2.5}$ standards (i.e., $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). The higher $PM_{2.5}$ concentration in the geographical center of the city and southern districts underscores the high pollutant emission and unfavorable dispersion conditions in this area, and the increased negative effects on health that these conditions would have. In total, the spatial average of the 2-year $PM_{2.5}$ concentration over 400 grid cells within the study region was estimated to be $23.1 \pm 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. This estimate was $\sim 63\%$ higher than the national averaged $PM_{2.5}$ concentration ($14.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in Russia in 2013 [31].

We underline that several quality control procedures had been conducted prior to the analysis to avert the failure of sensors. Less than 4% of point observations were found in the statistically unrealistic interval for each station (range outside ± 3 times of standard deviation from hourly mean). Such observations were removed beforehand. The field calibration of each sensor from the Nebo network was a major challenge due to the limited reference observations. To address these challenges, we used only the aggregated and averaged information from sensor observations at multiple stations (e.g., averaged diurnal and monthly variations in $PM_{2.5}$ concentration from the four sensors at SVE, PAV, LOP, and ALE stations) to calibrate the satellite observations. Our evaluation of the monthly average $PM_{2.5}$ concentrations in February 2018 from the sensor using reference monitoring suggested an insignificant systematic bias ($<5\%$).

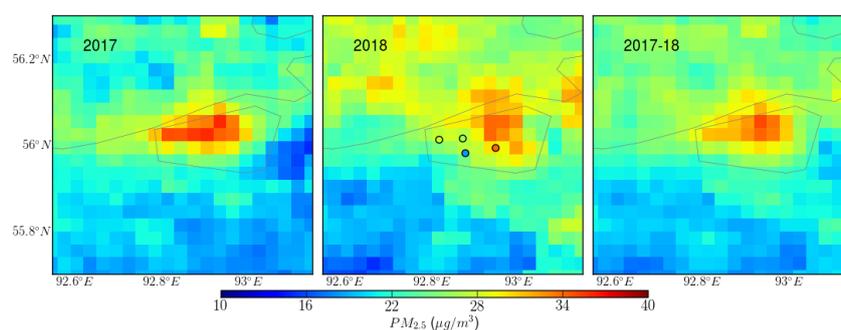


Figure 5. Left and middle panels show spatial distribution of satellite-derived annual averaged $PM_{2.5}$ concentrations (2017, 2018, 2017–2018 from left to right). Points in middle panel represent annual average $PM_{2.5}$ from the four sensors with full data coverage (2018)

$PM_{2.5}$ pollution episode in July 2018

As mentioned, $PM_{2.5}$ concentration had a distinct spike in July 2018. Panel a of Figure 6 shows the time series of $PM_{2.5}$ concentrations at PAV station in the middle of July 2018 ($PM_{2.5}$ concentrations reached $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ on July 13). We found that on July 13, 2018, the large forest areas in the close vicinity of Krasnoyarsk were engulfed by the wildfires (red dots on Figure 6). Also, we revealed the massive smoke plumes originated from wildfires in the northeastern direction from Krasnoyarsk. Krasnoyarsk was directly exposed to the increased

aerosol loading driven by smoke particles. Additional analyses of HYSPLIT back trajectory (shown in panel c) have also supported the smoke-transport hypothesis, that is, that the air masses transported smoke particles directly from the hotspot regions to Krasnoyarsk.

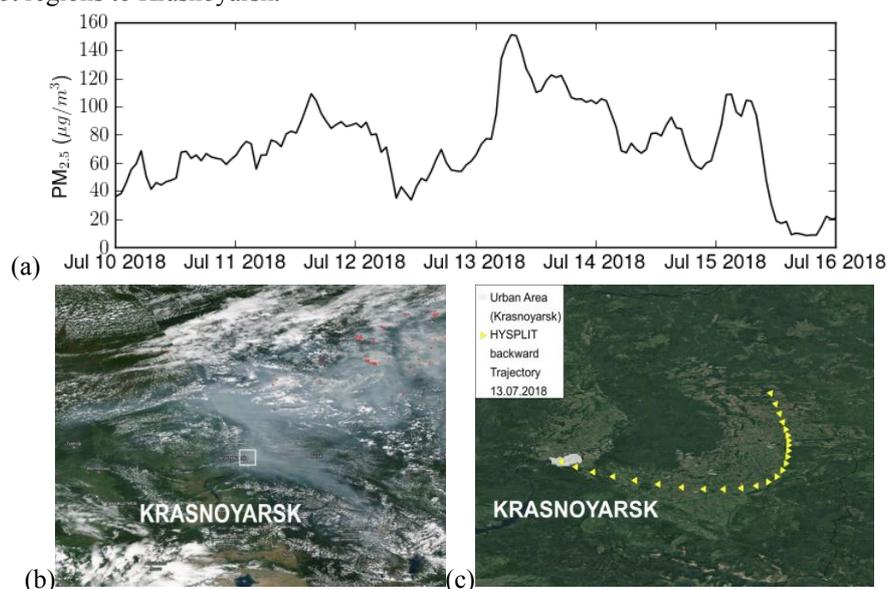


Figure 6. (a) Time series of PM_{2.5} concentration at PAV station in the middle of July 2018. (b) True-color images acquired from the MODIS instrument aboard Aqua satellite on July 13, 2018. Red points identify actively burning wildfires. (c) HYSPLIT back-trajectory analysis using 12-h setting (yellow triangles) near Krasnoyarsk (white pixels)

Conclusions

Our results demonstrate that low-cost sensor data and synergy method are sufficiently accurate that they can be used to assist governmental urban air-quality monitoring. Given the high level of agreement between the BAM and the AirVisual Node with which it was compared in Krasnoyarsk, local policymakers may find it beneficial to co-locate multiple AirVisual sensors with their reference stations for an extended period of time. In particular, the method is applicable in other industrial cities like Krasnoyarsk, where significant emission sources are well known but insufficient quantitative information exists. Its use could pave the way for nationwide projects for air quality improvement. This aspect is particularly important for Russia because its Clean Air program consists of ambitious plans for improving urban air quality in 12 industrial cities (including Krasnoyarsk) by 2021 [32]. From a global perspective, our PM_{2.5} estimation model relies on widely-available data and can thus be used to investigate PM_{2.5} pollution trends and effects in poorly observed regions. Such investigations may help to reveal previously unreported effects of aerosols on the environment, health, and climate on global scales. In the further studies AirVisual sensors should be deployed alongside PM_{2.5} reference monitors at a variety of urban and rural background locations to understand the sensors' response to various aerosol mixes. We emphasize that a further study is required to assess the spatial extent and resolution of the low-cost sensor sampling points and the site requirements of the sampling locations to provide the most accurate picture of PM_{2.5} across a city or region using this technique. Finally, evaluation of how this nonregulatory but potentially quite accurate data can inform government and citizen stakeholders is needed to improve public health and policy.

REFERENCES

1. Chan, T.-C., Zhang, Z., Lin, B.-C., Lin, C., Deng, H.-B., Chuang, Y.C., Chan, J.W.M., Jiang, W.K., Tam, T., Chang, L., et al. (2018). Long-Term Exposure to Ambient Fine Particulate Matter and Chronic Kidney Disease: A Cohort Study. *Environ. Health Perspect.* 126, 107002.
2. Lin, C.Q., Liu, G., Lau, A.K.H., Li, Y., Li, C.C., Fung, J.C.H., and Lao, X.Q. (2018). High-resolution satellite remote sensing of provincial PM_{2.5} trends in China from 2001 to 2015. *Atmos. Environ.* 180, 110–116.
3. Lin, C.Q., Li, Y., Lau, A.K.H., Deng, X.J., Tse, K.T., Fung, J.C.H., Li, C.C., Li, Z.Y., Lu, X.C., Zhang, X.G., et al. (2016). Estimation of long-term population exposure to PM_{2.5} for dense urban areas using 1-km MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 179, 13–22.

4. van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., and Villeneuve, P.J. (2010). Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environ. Health Perspect.* 118, 847–855.
5. van Donkelaar, A., Martin, R.V., and Park, R.J. (2006). Estimating ground-level PM_{2.5} using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 111.
6. Jin, X., Fiore, A.M., Curci, G., Lyapustin, A., Civerolo, K., Ku, M., Donkelaar, A. van, and Martin, R.V. (2019). Assessing uncertainties of a geophysical approach to estimate surface fine particulate matter distributions from satellite-observed aerosol optical depth. *Atmospheric Chem. Phys.* 19, 295–313.
7. Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., and Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environ. Int.* 75, 199–205.
8. Morawska, L., Thai, P.K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., et al. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environ. Int.* 116, 286–299.
9. Borrego, C., Costa, A.M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., Sioumis, Th., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., et al. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmos. Environ.* 147, 246–263.
10. Castell, N., Dauge, F.R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., and Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environ. Int.* 99, 293–302.
11. Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F.R., Lahoz, W.A., and Bartonova, A. (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environ. Int.* 106, 234–247.
12. Khlebopos R. R., Taseiko O. V., Ivanova Y. D., Mikhailuta S. V., (2012). *Ecological Reviews Krasnoyarsk (in Russian). Красноярск. Экологические очерки. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. – 130 с.*
13. Conard, S.G., and Davidenko, E.P. (1996). Fire in Siberian Boreal Forests — Implications for Global Climate and Air Quality. *Int. Symp. Air Pollut. Clim. Change Eff. For. Ecosyst. General Technical Report PSW-GTR-166*, 87–94.
14. Damoah, R., Spichtinger, N., Forster, C., James, P., Mattis, I., Wandinger, U., Beirle, S., Wagner, T., and Stohl, A. (2004). Around the world in 17 days - hemispheric-scale transport of forest fire smoke from Russia in May 2003. *Atmospheric Chem. Phys.* 4, 1311–1321.
15. Artyukhov, I.P., Arshukova, I.L., Dobretsova, E.A., Dugina, T.A., Shulmin, A.V., and Demko, I.V. (2015). Epidemiology of chronic obstructive pulmonary disease: a population-based study in Krasnoyarsk region, Russia. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 10, 1781–1786.
16. Singer, B.C., and Delp, W.W. (2018). Response of consumer and research grade indoor air quality monitors to residential sources of fine particles. *Indoor Air* 28, 624–639.
17. Guo, J., Miao, Y., Zhang, Y., Liu, H., Li, Z., Zhang, W., He, J., Lou, M., Yan, Y., Bian, L., et al. (2016). The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data. *Atmospheric Chem. Phys.* 16, 13309–13319.
18. Johnson, R.H., Ciesielski, P.E., and Cotturone, J.A. (2001). Multiscale Variability of the Atmospheric Mixed Layer over the Western Pacific Warm Pool. *J. Atmospheric Sci.* 58, 2729–2750.
19. Holzworth, G. (1964). Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. *Mon. Weather Rev.* 92, 235–242.
20. Holzworth, G.C. (1967). Mixing Depths, Wind Speeds and Air Pollution Potential for Selected Locations in the United States. *J. Appl. Meteorol.* 6, 1039–1044.
21. Rolph, G., Stein, A., and Stunder, B. (2017). Environmental Modelling & Software Real-time Environmental Applications and Display sYstem : READY. *Environ. Model. Softw.* 95, 210–228.
22. Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Ichoku, C., Remer, L.A., Tanré, D., and Holben, B.N. (2002). Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. *Geophys. Res. Lett.* 29, MOD2-1-MOD2-4.
23. Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Patadia, F., and Hsu, N.C. (2013). The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmos Meas Tech* 6, 2989–3034.

24. Lin, C., Lau, A.K.H., Fung, J.C.H., Lao, X.Q., Li, Y., and Li, C. (2019). Assessing the Effect of the Long-Term Variations in Aerosol Characteristics on Satellite Remote Sensing of PM_{2.5} Using an Observation-Based Model. *Environ. Sci. Technol.* 53, 2990–3000.
25. Lin, C., Li, Y., Yuan, Z., Lau, A.K.H., Li, C., and Fung, J.C.H. (2015). Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM_{2.5}. *Remote Sens. Environ.* 156, 117–128.
26. Gao, M., Cao, J., and Seto, E. (2015). A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM_{2.5} in Xi'an, China. *Environ. Pollut.* 199, 56–65.
27. Holstius, D.M., Pillarisetti, A., Smith, K.R., and Seto, E. (2014). Field calibrations of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California. *Atmospheric Meas. Tech.* 7, 1121–1131.
28. Smolyakov, B.S., Makarov, V.I., Shinkorenko, M.P., Popova, S.A., and Bizin, M.A. (2014). Effects of Siberian wildfires on the chemical composition and acidity of atmospheric aerosols of remote urban, rural and background territories. *Environ. Pollut.* 188, 8–16.
29. Watson, J.G. (2002). Visibility: Science and Regulation. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 52, 628–713.
30. Mikhailuta, S.V., Taseiko, O.V., Pitt, A., Lezhenin, A.A., and Zakharov, Y.V. (2009). Seasonal variations of air pollutant concentrations within Krasnoyarsk City. *Environ. Monit. Assess.* 149, 329–341.
31. Brauer, M., Freedman, G., Frostad, J., van Donkelaar, A., Martin, R.V., Dentener, F., Dingenen, R. van, Estep, K., Amini, H., Apte, J.S., et al. (2016). Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013. *Environ. Sci. Technol.* 50, 79–88.
32. Government of Russian Federation (2019). Federal Policy “About conducting experiment for regulating pollutants from emissions and about complementing the federal laws on decreasing atmospheric pollution.” N 4483p-P9 (N 4483п-П9). Signed by D. Medvedev on 23.05.2019 in Moscow (document in Russian).

Лобанов В.А.* , Маммедов С.А., Наурозбаева Ж.К., Григорьева А.А.

Особенности изменений климата на разных пространственно-временных масштабах

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный гидрометеорологический университет»
Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, дом 98
*E-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

Рассматриваются проблемы исследования изменений климата в зависимости от интервала времени и масштаба пространства. Климат за всю историю атмосферы Земли не оставался постоянным и изменялся в зависимости от внешних и внутренних факторов. Анализ климатических условий фанерозоя свидетельствует, что температуры на Земле изменялись от 8–10°C в периоды оледенений до 20–25°C в периоды потеплений. Концентрация CO₂ в среднем составляла 2000 ppm и с пиками в 7000 ppm, что в 5–20 раз выше современной. Данные ледяных кернов подтверждают неравновесность климатической системы и правомерность триггерного механизма. Динамика современного изменения климата также оказывается разной в зависимости от рассматриваемого пространственного масштаба: для глобальной температуры – это монотонный тренд роста, для региональных климатических характеристик – ступенчатые переходы от одних стационарных состояний к другим. Для севера Восточного полушария причиной является резкое усиление Северо-Атлантического колебания в конце 1980-х. **Ключевые слова:** особенности климата, методы, модели, пространственно-временные масштабы, тренды и ступенчатые изменения.

**Vladimir A. Lobanov* , Sapa A. Mammedov, Zhanar K. Naurozbaeva,
Aljona A. Grigoryeva**

Features Of Climate Change At Different Spatio-Temporal Scales

Russian State Hydrometeorological University
Russia, 195196, St. Petersburg, Maloohinsky Prospekt, 98
*E-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

The problems of studying climate change depending on the time interval and the scale of space are considered. The climate in the entire history of the Earth's atmosphere did not remain constant and changed depending on external and internal factors. An analysis of the climatic conditions of the Phanerozoic indicates that temperatures on Earth varied from 8–10°C during glaciation periods to 20–25°C during warming periods. The average CO₂ concentration was 2000 ppm and with peaks at 7000 ppm, which is 5–20 times higher than the current one. Data from ice cores confirm the disequilibrium of the climate system and the legitimacy of the trigger mechanism. The dynamics of modern climate change also turns out to be different depending on the spatial scale under consideration: for global temperature it is a monotonous growth trend, for regional climatic characteristics it is stepwise transitions from one stationary state to another. For the north of the Eastern Hemisphere, the reason is a sharp increase in the North Atlantic Oscillation in the late 1980s. **Keywords:** climate features, methods, models, spatio-temporal scales, trends and step changes.

Введение

Климат Земли изменялся постоянно с момента возникновения атмосферы в архее, состав которой был разным от аммиачно-метанового с начально большим содержанием углекислого газа до современного азотно-кислородного с содержанием парниковых газов в 0.1% от общего объема. Колебания климата были обусловлены как изменением приходящей радиации, так и внутренними автоколебаниями, связанными с углеродными и другими химическими циклами. При этом средняя температура планеты, даже если рассматривать только период фанерозоя в последние 580–600 млн. лет, изменялась от 8–10°C в периоды оледенений до 20–25°C в периоды потеплений. Концентрация CO₂ практически за весь фанерозой была достаточно высокой в среднем около 2000 ppm и с пиками в 7000 ppm, что в 5–20 раз выше современной

[1]. На формирование климата на протяжении всей истории планеты влияли природные факторы разных временных масштабов: от быстрых процессов, связанных с 11-летними циклами волновой и корпускулярной энергии Солнца до колебаний астрономических факторов в десятки – сотни тысяч лет (динамика прецессии, угла наклона оси и эксцентриситета орбиты) и геофизических в сотни миллионов лет (движение материков). Причем колебания каждого из природных процессов являются сложными и сами состоят из составляющих разного временного масштаба. Если рассматривать колебания климата на основе концепции аттракторов Э.Н. Лоренца [2], то аттрактор, соответствующий современному климату, возник примерно 38 млн. лет назад. В это время сформировалась современная конфигурация планеты, связанная с обособлением материка Антарктиды на южном полюсе и созданием широтного пояса гор от Атлантики практически до Тихого океана в восточном полушарии, который замедлил теплообмен между экватором и Северным полюсом и усилил западный перенос.

Все эти особенности современного климата делают его достаточно прохладным и неустойчивым, особенно к оледенениям [3]. Известная череда оледенений четвертичного периода в последние 2 млн. лет как раз и обусловлена небольшими изменениями инсоляции при колебаниях параметров орбиты Земли. Последние хорошо известные климатические колебания: малый климатический оптимум 8–13 веков и малый ледниковый период 14–19 веков также были обусловлены наложением астрономических и внутренних автоколебательных факторов климатической системы.

Методы изучения и особенности климатической системы

В настоящее время преобладающим научным направлением изучения изменений климата является физико-математическое моделирование, которое также считается перспективным и в создании общей теории климата, включающей в себя физическую, статистическую, гидродинамическую, математическую и вычислительные части [4]. Однако, современные трехмерные модели климата имеют еще много недостатков и ограничений как информационного, так и теоретико-понятийного плана [5]. Поэтому наряду с моделями развиваются и другие направления изучения изменений климата, например, эмпирико-статистическое и палеоанalogии.

Именно анализ эмпирических данных и позволяет выявить особенности поведения климатической системы. Так, проекты по глубокому бурению ледяных кернов в Антарктике позволили установить две главные закономерности климата [6]. Прежде всего, это наличие хорошо выраженных 100-тысячелетних циклов колебания температуры, которые связаны с колебаниями эксцентриситета орбиты Земли (рис.1).

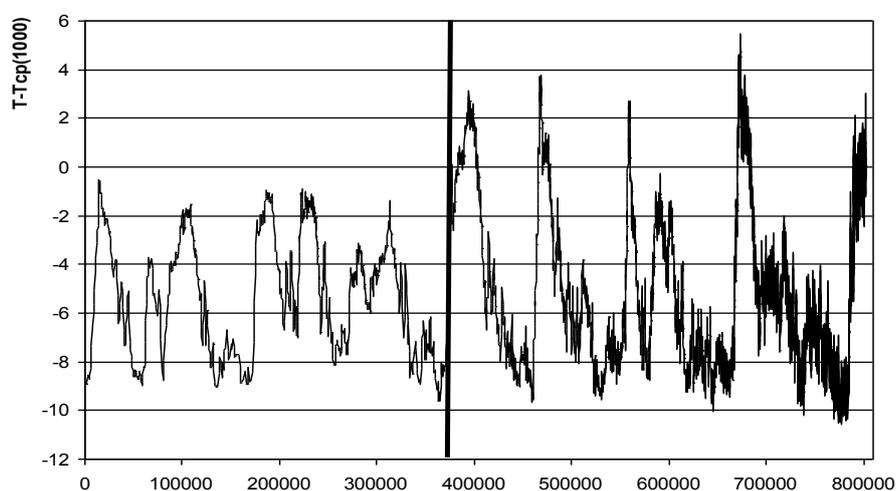


Рис. 1. Колебания изотопной температуры воздуха за последние 800 тыс. лет по данным ледниковых кернов Антарктиды

Главный вывод состоит не только в том, что циклы имеют хорошо выраженную асимметрию: период роста температур очень быстрый и составляет около 10 тыс. лет, затем идет теплый период на вершине цикла (также примерно 10 тыс. лет) и далее неравномерное падение и связанный с ним холодный период в 70–80 тыс. лет. Поэтому, если наш период голоцена уже длится примерно 10 тыс. лет [7], то очень высока вероятность в ближайшее время начала перехода к оледенению, о чем свидетельствуют и современные данные об астрономических факторах. Вместе с тем основной вывод из этих данных в том, что преобладающим в колебаниях климата является изменение эксцентриситета орбиты, хотя его вклад в

колебания инсоляции по сравнению с прецессией и наклоном оси является крайне низким (4%) и даже при расчете облучения Земли в прошлом М.Миланкович не принимал его во внимание [8]. Поэтому малые внешние воздействия могут приводить к большим изменениям внутри климатической системы.

Второй интересный вывод связан со сравнением реконструированных рядов изотопной температуры и CO_2 , которое показало, что в прошлом максимум температуры был на 5-8 тыс. лет раньше, чем максимум CO_2 , что обусловлено полным перемешиванием океана. Отсюда следует, что в настоящее время океан еще поглощает CO_2 и а отдавать будет через несколько тысяч лет.

Влияние пространственно-временных масштабов на особенности изменений климата

Еще одной не менее важной проблемой при изучении изменений климата, является влияние пространственно-временных масштабов изучаемого процесса на получаемые результаты. Общеизвестно, что глобальная температура воздуха монотонно увеличивается с середины 19 века и особенно интенсивно стала расти с 1980х годов, что сформировало ее общий прирост в $0,8-1,2^\circ\text{C}$. Вместе с тем принципиальное значение имеет вид динамики во времени. Обычно временной ряд глобальной температуры аппроксимируют нелинейным трендом, что вполне соответствует гипотезе об атмосфере как равновесной системе. Тогда монотонный рост температуры вполне объясним монотонным ростом концентрации CO_2 и других парниковых газов. Вместе с тем возможен и другой подход, основанный на концепции триггерного механизма и переходе климатической системы из одних квазистационарных состояний в другие. На рис. 2 показана аппроксимация ряда глобальной температуры моделью ступенчатых изменений [7] и в этой комплексной климатической характеристике выделяется несколько однородных периодов. Если же перейти от глобального масштаба к региональному, то триггерный механизм климатических изменений проявляется еще нагляднее.

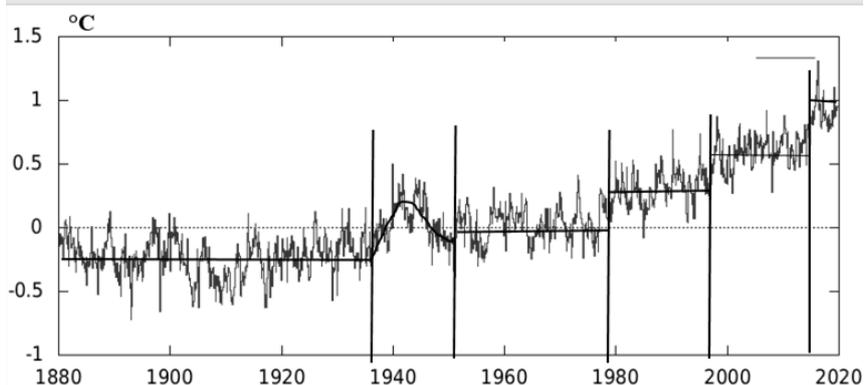


Рис. 2. Аппроксимация ряда глобальной температуры в отклонениях от нормы моделью ступенчатых изменений

На рис. 3 приведены графики изменений среднегодовой температуры и речного стока для территории России, в которых можно выделить два квазистационарных периода: до и после 1987 г. [9].

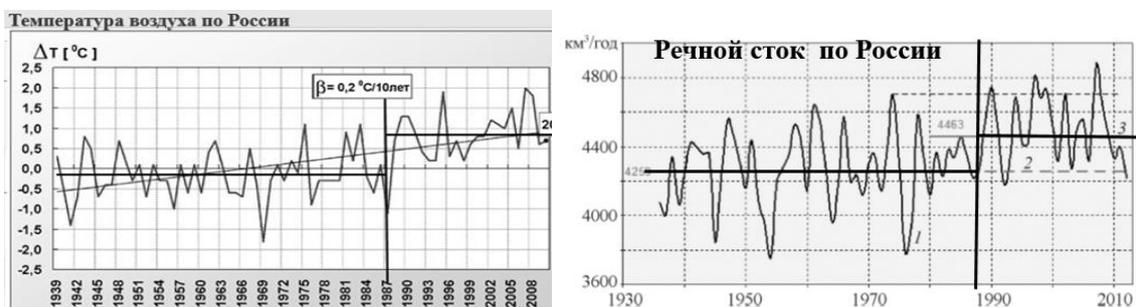


Рис. 3. Выделение квазистационарных периодов в рядах температуры и речного стока на территории России

Для рядов наблюдений за температурой воздуха на отдельных метеостанциях переход от одного стационарного режима к другому, который произошел в конце 1980-х является практически единственным

за всю историю многолетних аблюдений, как показано на рис.4 (слева) для ряда среднегодовых температур на метеостанции Кострома с 1840 года [10].

Исследование рядов отдельных месяцев показало, что такие ступенчатые переходы имеют место не во все месяцы, а только в феврале, марте и апреле. Поэтому к полученным результатам на основании пространственно-временных осреднений надо относиться осторожно, так как осреднения являются своеобразным математическим фильтром, который отфильтровывает существенные случайные колебания и выделяет далеко не всегда значимые нестационарности.

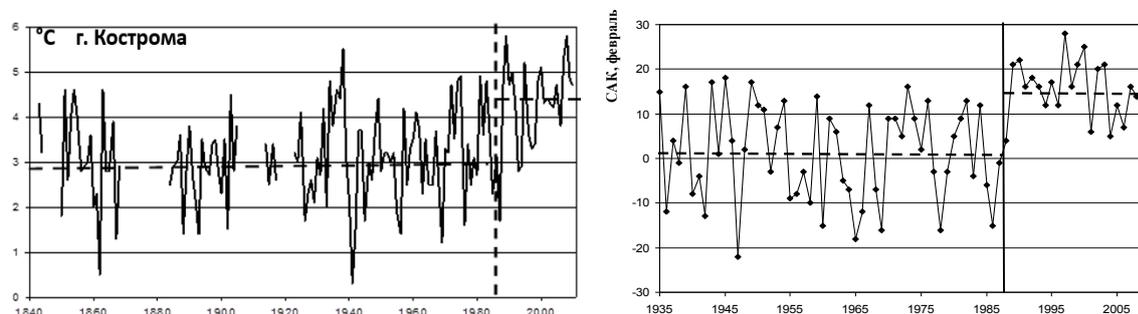


Рис. 4. Ступенчатый рост среднегодовой температуры на метеостанции Кострома (слева) и индекса Северо-Атлантического колебания в феврале (справа)

Полученный ступенчатый рост температуры в конце 1980-х наблюдается как на метеостанциях на территории Европы, так и в азиатской части России вплоть до Якутии. Установлено, что причина такого потепления, и особенно в холодный период, связана со ступенчатым ростом индекса Северо-Атлантического колебания (САК), как показано на рис. 4 (справа) для февраля, который произошел также в конце 1980-х. Индекс САК характеризует нормированную разность давления между двумя основными центрами действия атмосферы в северной части Восточного полушария: исландским минимумом и азорским максимумом. В случае роста САК, что проявилось в период с января по апрель, западный перенос усиливается и теплые воздушные массы с Атлантики проникают как на европейский, так и на азиатский континенты.

Для оценки эффективности предлагаемой модели ступенчатых изменений, по сравнению со стационарной моделью временного ряда и моделью тренда, разработаны соответствующие статистические методы и критерии [6]. Преимущество модели ступенчатых изменений показано в разных районах Земли и для разных как климатических характеристик, так и для разных климатических индикаторов: температура почвы, характеристики ледового режима рек и морей, естественные лесные пожары, речной сток и другие [11–14].

Заключение

Климат Земли даже в последний его квазиоднородный период формируется целым комплексом факторов разного временного масштаба. В зависимости от рассматриваемого отрезка времени можно получить разные выводы о его изменениях: от колебаний в миллионы и сотни тысяч лет, до современной цикличности в сотни и десятки лет. Аналогичным образом в зависимости от пространственного масштаба могут быть получены выводы или о монотонном тренде глобальной температуры или о ступенчатых изменениях в регионе и на конкретных станциях. Эти ступенчатые изменения обусловлены резкой сменой типов атмосферной циркуляции в конце 1980-х, что повлияло на климатические характеристики в северной части Восточного полушария.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mitchell J.M. (1990) Climate variability: past, present & future. *Climate Change*, 16, 231 – 46 pp.
2. Лоренц Э.Н. Детерминированное неперiodическое течение // Странные аттракторы. – М.: Мир, 1981. – С. 88–117.
3. Зубаков В.А. Глобальные климатические события плейстоцена. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 250 с.
4. Дымников В.П., Филатов А.Н. Основы математической теории климата. – М.: ВИНТИ, 1994. – 256 с.
5. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change). 2013. The physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley (eds). Cambridge University Press: Cambridge, p. 1552.

6. Цыганова Е.А., Саламатин А.Н. Палеоклиматическая интерпретация изотопного состава и возраст ледяного керна со станции Восток, Центральная Антарктида. Материалы гляциологических исследований, №100, 2006, с. 5–23.
7. Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений. Ученые записки РГГМУ №14, 2010, с.73–88.
8. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.; Л.: ГОНТИ, 1939. – 207 с.
9. Первый оценочный доклад «Изменение климата на территории Российской Федерации», М., Росгидромет, 2008. – 1020 с.
10. Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России. Географический вестник, Пермский университет, 2016, № 3(38), с. 79–89.
11. Лобанов В.А., Кириллина К.С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография - Санкт-Петербург, Изд-во РГГМУ, 2019. – 157 с.
12. Лобанов В.А., Горошкова Н.И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения. Ученые записки РГГМУ, № 55, 2019, с. 86–98.
13. Лобанов В.А., Маммедов С.А. Оценка климатических изменений температуры воздуха и их устойчивости на территории Центральной Азии. Ученые записки РГГМУ, № 51, 2018, с. 22–26.
14. Лобанов В.А., Наурузбаева Ж.К. Климатические изменения толщины льда на Северном Каспии. Ученые записки РГГМУ, № 53, 2018, с. 172–187.

Логинов В.Ф.**Роль космических факторов в изменении климата**

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси»
ул. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь
E-mail: nature@ecology.basnet.by

Рассмотрена роль космических факторов: солнечной активности, инсоляции Земли, приливообразующей силы квазидевятнадцатилетнего лунного деклинационного прилива, скорости вращения Солнца относительно центра масс Солнечной системы в изменении температуры воды Мирового океана за период с 1885 по 2018 гг. Использован метод спектрально-сингулярного анализа. Выделены квазипериодические составляющие во временных рядах температуры в разных областях спектра: квазипятидесятилетние, квазидвадцатилетние, квазидвадцатилетние и короткопериодные колебания 3–8 лет. Наиболее ярко выраженными оказались квазипятидесятилетнее колебание в изменении температуры воды Атлантического океана и квазидвадцатилетнее колебание в восточной части Тихого океана. Степень и характер проявления космических факторов зависит от начальных условий в климатической системе. Квазипятидесятилетнее и квазидвадцатилетнее колебания температуры воды коррелируют с изменениями скорости движения Солнца относительно центра масс Солнечной системы.

Ключевые слова: космические факторы, температура океана, квазипериодические колебания.

Vladimir F. Loginov**Role of Space Factors in Climate Change**

Institute for Nature Management of National Academy of Science of Belarus
10, F. Skoriny str., 220076, Minsk, Belarus
E-mail: nature@ecology.basnet.by

The role of space factors in the World Ocean water temperature change for the period from 1885 to 2018 is investigated. Such factors as solar activity, Earth insolation, tidal force of a quasi 19-year lunar declination tide and the Sun's wobble around the center of mass of the Solar System are considered. Singular spectrum analysis method was used. Quasi 60-year, quasi 20-year, quasi 11-year and 3–9 year short-period oscillations in temperature time series are highlighted. Quasi 60-year oscillation in the Atlantic Ocean water temperature change and quasi 20-year oscillation in the Eastern Pacific happen to be the most pronounced. Manifestation of space factors depends on initial conditions in the climate system. Quasi 60-year and quasi 20-year oscillations correlate with changes in the Sun's wobble around the center of mass of the Solar System.

Keywords: space factors, ocean temperature, quasiperiodic oscillations.

Несмотря на большое количество выполненных за последние несколько сот лет исследований, проблема влияния малых внешних сил на атмосферу, гидросферу и литосферу остается предметом острых дискуссий [1–4]. Не отрицая важности снижения выбросов парниковых газов в атмосферу и необходимости увеличения их поглотительной способности биосферой и гидросферой, необходимо обратить больше внимания на исследование естественных факторов изменения климата и в первую очередь изучению Мирового океана как главного модулятора климатических изменений (циклов, скачков, пауз), а также роли малых космических факторов в изменении климата.

В силу малости энергетического воздействия малых внешних сил на погоду и климат по сравнению с другими общепризнанными климатообразующими факторами они не могут быть учтены в уравнениях гидродинамики и поэтому влияние таких сил принимается маргинальным и в подавляющем числе случаев вообще не заслуживает даже упоминания. Однако оценки влияния малых внешних факторов на климатическую систему продолжают появляться в научной литературе и поэтому заслуживают более внимательного рассмотрения, что, собственно, и сделано в представленной работе.

Известно, что подавляющем числе случаев вероятность обнаружения квазипериодичностей, как правило, не превышает вероятности появления таковых в результате выборочной изменчивости оценок. В этой связи для выявления роли малых климатообразующих факторов (солнечная и геомагнитная

активность, планетные влияния и др.) более перспективным окажется другой путь. Он лежит в плоскости разложения гидрометеорологических полей (рядов) по естественным временным ортогональным составляющим и последующим анализом оценок тесноты и характера связей изменения выявленных компонент с «малыми» климатообразующими факторами.

Исследование пространственно-временных изменений температуры воды Мирового океана [5] с использованием спектрально-сингулярного анализа [6] позволило выявить устойчивую во времени и пространстве квазишестидесятилетнюю компоненту в изменении температуры воды.

Выявлено, что в Атлантическом секторе Земного шара доля дисперсии долгопериодных компонент (квазишестидесятилетних и квазитридцатилетних) от общей дисперсии рядов температуры воды больше, чем доля подобных компонент в Тихоокеанском и Индийском секторах, что, вероятно, связано с пространственной структурой большого термохалинного конвейера: в Атлантическом океане теплые воды проникают до 70-х широт, тогда как в Тихом океане петля Брокера достигает только 40-х широт. Образно говоря, длина «ленты транспортера», перемещающего теплые и холодные воды, в Атлантическом секторе существенно больше, чем в других океанах.

В Тихоокеанском секторе временные изменения глобального явления в климатической системе «Эль-Ниньо-Южное колебание» более выражены в короткопериодной части спектра (2–7 лет); здесь квазидвадцатилетние главные компоненты в температуре воды выражены ярче, чем в Атлантическом секторе.

Анализ пространственно-временных особенностей проявления трендовых составляющих в температуре воды Мирового океана не позволил уверенно соотнести их с ростом содержания парниковых газов в атмосфере.

В приполярных районах Северной Атлантики доля дисперсии квазишестидесятилетней компоненты от общей дисперсии ряда температуры достигает 47,6 % (см. рисунок 1). Из других компонент следует выделить квазитридцатилетнюю и квазидвадцатидвухлетнюю. Трендовая компонента температуры на этих широтах оказалась незначительной: положительный тренд температуры воды заметен лишь в последнее тридцатилетие. Это может свидетельствовать о том, что потепление климата стало выраженным лишь в последнее время.

В умеренной, субтропической и тропической зоне доля дисперсии квазишестидесятилетней компоненты от общей дисперсии ряда температуры воды уменьшается почти в 2 раза, а доля трендовой компоненты становится соизмеримой с долей квазишестидесятилетнего колебания; в субтропиках восточной части Южной Атлантики (~30° ю.ш.) она превысила 75 % от общей дисперсии ряда температуры воды.

Проявление названных циклов более ярко выражены в районах энергоактивных зон в океане и атмосфере, на восточной периферии океанических антициклонов над поверхностью холодных морских течений, где затраты тепла на испарение меньше по сравнению с областями теплых морских течений. Турбулентный поток здесь мал по абсолютной величине и летом направлен от атмосферы к более холодной поверхности океана.

Большую часть года радиационный баланс превышает затраты тепла на испарение и значительное количество тепла передается в более глубокие слои океана. Это тепло идет на нагревание холодных масс воды, переносимых течениями. В восточных частях океана происходит оседание воздуха с больших высот, возникают инверсии температуры и устойчивая стратификация тропических воздушных масс. В результате здесь ослабляются вертикальные конвективные движения, воздух как бы «запирается» в тонком приземном слое – идет активное нагревание воды.

Среднее время наступления максимумов и минимумов квазишестидесятилетнего колебания в изменении температуры воды на 75° с.ш. относительно 30° ю.ш. запаздывает на 30–31 год, а полная продолжительность круговорота воды в Атлантическом океане (30° ю.ш. – 75° с.ш.) составляет около 62 лет.

Исследование температуры Атлантического океана показало, что гидрологические условия широтного пояса Южной Атлантики (26–36° ю.ш.), вероятно, могут претендовать на уникальность. Она заключается в непрерывном росте температуры в течение 115 лет (паузы в изменении температуры здесь выражены слабее, чем в других районах Земного шара), тогда как даже в Арктике, где парниковое потепление, исходя из положений парниковой теории климата, должно быть более ярко выражено, наблюдалась эпоха, когда температура воздуха была ниже нормы (1956–1978 гг.).

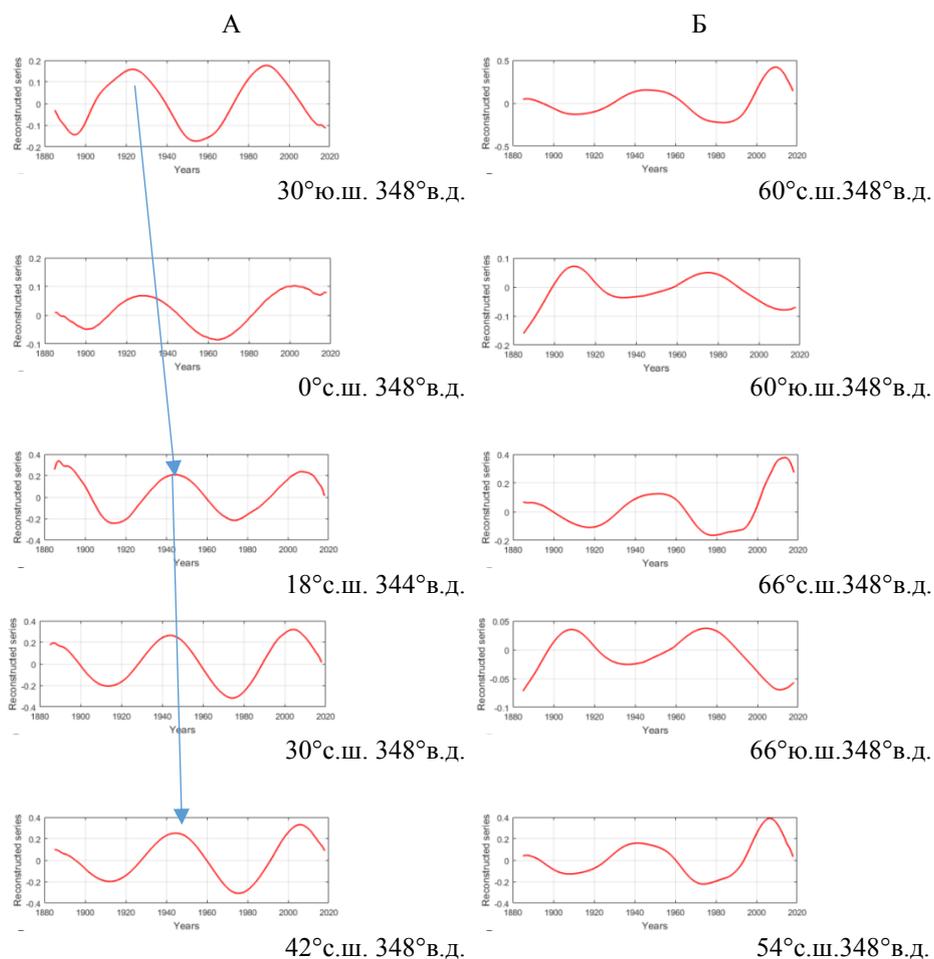


Рис. 1. Квазишестидесятилетняя компонента в изменении температуры воды в Восточной части Атлантического океана: А – в низких и средних широтах Северного полушария; Б – в высоких широтах Северного и Южного полушарий

Температура здесь стала активно расти только в конце 1980-х годов. Можно считать сюрпризом, что указанная субтропическая широтная зона Южной Атлантики более «правильно» реагирует на увеличение содержания парниковых газов в атмосфере, чем высокие широты, где альбедные положительные связи должны обеспечивать более интенсивное потепление, чем в среднем на Земном шаре. Таким образом температура в квадрате ($\varphi = 26-36^\circ$ ю.ш., $\lambda = 20^\circ$ з.д.– 5° в.д.) может претендовать на роль предиктора температуры воды в Северной Атлантике ($\varphi = 30^\circ$ ю.ш., $\lambda = 18^\circ$ з.д.), и, как следствие, температуры воздуха в Европе, на что ранее обратил внимание Б.Г. Шерстюков.

Обращает на себя внимание, что в высоких широтах Северного и Южного полушарий фазировка квазишестидесятилетнего колебания температуры воды обратная (см. рисунок).

Если сравнить выявленную структуру колебаний температуры с колебаниями температуры в Атлантическом океане, то в последнем вклад главных квазишестидесятилетних компонент в изменении температуры воды существенно больше, чем в Тихом океане.

Если сравнить выявленную структуру колебаний температуры с колебаниями температуры в Атлантическом океане, то в последнем вклад главных квазিশестидесятилетних компонент в изменении температуры воды существенно больше, чем в Тихом океане.

Главными компонентами в изменении температуры воды Тихого океана часто и со значительной амплитудой становятся квазисорокалетние и квазипятидесятилетние компоненты. Особенно ярко такие компоненты проявляются в изменении температуры в восточной части, в субтропиках Тихого океана, в Южном океане (зона умеренных и высоких широт) и в северной части (чаще в субтропиках).

Яркой особенностью в изменении температуры воды в восточной части Тихого океана являлась обнаруженная квазидвадцатилетняя компонента с такой фазировкой, как и фазировка скорости движения Солнца относительно центра масс Солнечной системы (максимумы около 1881, 1901, 1921, 1940, 1961, 1981, 2000, 2020 гг.).

Различия продолжительности главных компонент в Атлантическом океане по сравнению с главными компонентами в изменении температуры воды в восточной части Тихого океана и в Индийском океане могут быть связаны с пространственной структурой большого океанического конвейера воды в Мировом океане. В Атлантическом океане длина «ленты транспортера», переносящего теплые воды по поверхности океана, а холодные – на глубине, будет максимальной и время полного цикла обращения вод в Атлантическом океане будет существенно больше, чем в других океанах.

Квазидвадцатилетнее колебание в изменении скорости движения Солнца (синодический период Юпитера и Сатурна) относительно центра масс Солнечной системы и квазидвадцатидвухлетний магнитный цикл числа солнечных пятен (21–22 года) взаимосвязаны между собой и разделить их роли в изменении климата весьма затруднительно в силу отсутствия длинных рядов наблюдений температуры воды Мирового океана.

В проявлениях квазидвадцатилетнего цикла в температуре воды характерна пространственная «пятнистость». Тенденция к более частому проявлению этого цикла характерна для восточной части Тихого океана. Проявление квазидвадцатилетних компонент в изменении температуры воды Мирового океана менее заметно, чем квазিশестидесятилетних. И это наблюдается несмотря на то, что амплитуда изменений скорости движения Солнца относительно центра масс Солнечной системы в квазидвадцатилетнем цикле существенно больше, чем в квазিশестидесятилетнем.

Изменения температуры воды в значительном числе точек Мирового океана коррелируют с изменениями скорости движения Солнца относительно центра масс Солнечной системы. Коэффициенты корреляции статистически значимы (Рслуч. < 5 %) квазিশестидесятилетних компонент сопоставляемых характеристик, особенно в Северной Атлантике.

Приведенные результаты по оценке роли космических факторов в изменении температуры Мирового океана могут свидетельствовать о том, что начальные условия в атмосфере и гидросфере определяют характер и степень проявления космических факторов в климатической системе, а космические факторы следует рассматривать как триггеры климатических изменений. Более яркое проявление долгопериодной (квазিশестидесятилетней) компоненты в изменении температуры воды Мирового океана по сравнению с короткопериодной (двадцатилетней) связано с наличием в климатической системе автоколебания подобной длительности [5], а в формулу, описывающую воздействие космического фактора на атмосферу, параметр времени должен входить в степени большей единицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев В.Н., Саруханян Э.Н., Смирнов Н.П. Лунный нодальный (деклинационный) прилив и его возможное влияние на циркуляцию атмосферы // Учёные записки. 2006. № 2. С. 7–19.
2. Логинов В.Ф., Микуцкий В.С. Изменения климата: тренды, циклы, паузы / Минск, Беларуская навука, 2017, 179 с.
3. Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата / Москва, Физматлит, 2018, 232 с.
4. Scafetta N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature // J. Atmos. Sol. Ter. Phys. 2012. Vol. 74. P. 145–163.

5. The Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) dataset is a global monthly sea surface temperature analysis derived from the International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/marineocean-data/extended-reconstructed-sea-surface-temperature-ersst-v3b>.

6. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов : учеб. пособие / Санкт-Петербург, 2004, 76 с.

Малинин В.Н.^{1*}, Вайновский П.А.²

Изменчивость влагообмена между океаном и атмосферой и глобальное потепление

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»,
Россия, Санкт-Петербург, 192007, Воронежская, д. 79

*E-mail: malinin@rshu.ru

²ООО «Прогноз»,
Россия, Санкт-Петербург, 197022, Малый пр., д. 87

В работе обсуждается межгодовая изменчивость компонент влагообмена в глобальной системе океан-атмосфера, а также температуры воздуха и поверхности океана по данным известного архива NCEP/NCAR Reanalysis-2 за 1979–2019 гг. Показано, что тренд в осадках в единицах выделяемой энергии составляет $0,34 \text{ Вт/м}^2$, что превышает радиационный форсинг всех парниковых газов, исключая CO_2 . Вклад тренда осадков в радиационный форсинг CO_2 для современного глобального потепления составляет 45 %. Установлено, что изменчивость вертикального влагообмена определяется процессами крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой и не является следствием глобального потепления. На основе анализа трендов влагосодержания атмосферы и температуры воздуха для 10-градусных широтных зон Мирового океана показано, что доминирующей причиной формирования парникового эффекта при ясном небе, максимум которого отмечается в низких широтах, является влагосодержание атмосферы.

Ключевые слова: мировой океан, испарение, осадки, влагосодержание атмосферы, температура воздуха, тренды.

Valeriy N. Malinin^{1*}, Pavel A. Vainovsky

Variability of moisture exchange between the ocean and the atmosphere and global warming

¹Russian State Hydrometeorological University
Russia, St. Petersburg, 192007, Voronezhskaya, 79

*E-mail: malinin@rshu.ru

²LLC «Прогноз»
Russia, St. Petersburg, 197022, Maly pr. 87

The work discusses the interannual variability of the moisture exchange components in the global ocean-atmosphere system, as well as the temperature of air and ocean surface according to the well-known NCEP/NCAR Reanalysis-2 archive for 1979–2019. The trend in precipitation is shown to be $0,34 \text{ W/m}^2$ in units of released energy, which exceeds the radiation forcing of all greenhouse gases, excluding CO_2 . The contribution of the precipitation trend to CO_2 radiation forcing for modern global warming amounts to 45%. The variability of vertical moisture exchange has been found to be determined by the processes of large-scale interaction of the ocean with the atmosphere and not to be a consequence of global warming. Based on the analysis of trends in atmospheric moisture content and air temperature for 10-degree latitudinal zones of the World ocean, it is shown that the dominant reason for the formation of the greenhouse effect in a clear sky, the maximum of which being observed in low latitudes, is the moisture content of the atmosphere.

Keywords: world ocean, evaporation, precipitation, total precipitable water, air temperature, trends.

Введение

Проблема происхождения (генезиса) глобального потепления в XX столетии считается одной из центральных в современной науке. Огромное число всевозможных гипотез («концепций», «теорий») по сути можно свести в три основные группы. В настоящее время самой распространенной является гипотеза антропогенного характера формирования тренда в глобальной температуре, в соответствии с которой определяющим признается углекислый газ. Гипотеза антропогенного роста глобальной температуры наиболее широко распространена в зарубежных исследованиях. Главным ее проводником стала МГЭИК,

по сути определяющая научную политику в области изучения климата за рубежом. Наиболее четко она была сформулирована в Пятом отчете МГЭИК [1]: «...в высшей степени вероятно (*extremely likely*, 95–100%), что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX столетия». Выразителем взглядов группы МГЭИК является бывший вице-президент США Альберт Гор, который в своей книге «Неудобная правда» [2] пишет, что чуть ли не 98 % исследователей придерживается данной точки зрения. Существует альтернативная точка зрения, в соответствии с которой глобального потепления как такового вообще не существует, а есть естественные циклы с противоположными фазами относительного потепления и похолодания. Данная точка зрения имеет значительное число сторонников, прежде всего, в России. Наконец, есть и «промежуточная» точка зрения, в соответствии с которой современное потепление климата обусловлено не только ростом концентрации парниковых газов, но и естественными факторами. Довольно четко она была сформулирована академиком К. Я. Кондратьевым [3], по мнению которого по целому ряду причин нет оснований считать, что глобальное потепление обусловлено только ростом концентрации ПГ.

Мы полностью разделяем эту позицию и считаем, что формирование глобального потепления обусловлено не столько антропогенной деятельностью, сколько процессами крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причем положительные связи преобладают. Главенствующей является положительная обратная связь между влагосодержанием атмосферы и температурой воздуха. Поскольку главный парниковый газ – это водяной пар, то при его росте за счет повышения испарения, с одной стороны, в результате парникового эффекта происходит повышение глобальной температуры воздуха, а с другой – рост ТВ приводит к повышению ВА. При этом углекислый газ является своеобразным катализатором глобального потепления. Его рост – это фактор усиления обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием, не допускающий движения климатической системы в сторону похолодания [4].

Цель данной работы заключается в статистическом анализе межгодовой изменчивости составляющих влагообмена в системе океан-атмосфера и оценке их взаимосвязи с глобальным потеплением за последние 40 лет.

Исходные данные

В данной работе использовался архив NCEP–DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2) [5], который охватывает спутниковый период с 1979 г. по настоящее время и использует обновленные модели прогноза, ассимиляции данных, улучшенные диагностические результаты, в том числе исправления ошибок обработки, выявленных в NCEP-NCAR Reanalysis-1. В Reanalysis-2 сделаны значительные уточнения в параметрах потоков для суши и океана у земной поверхности. Данные NCEP/NCAR Reanalysis-2 находятся в свободном доступе по адресу <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.gaussian.html>. Из этого архива выбирались среднемесячные значения полей испарения (E), осадков (P), влагосодержания атмосферы (ВА), температуры воздуха в приземном слое (ТВ) и температуры поверхности океана (ТПО) в узлах гауссовой географической сетки ($1,875^\circ \times 1,904^\circ$) для открытой водной поверхности океана. Указанные выше характеристики были рассчитаны для глобальной системы океан-атмосфера за период 1979–2019 гг.

Результаты расчетов и обсуждение

В табл. 1 представлены некоторые статистические характеристики компонент вертикального влагообмена с атмосферой, а также ТВ и ТПО для Мирового океана. Прежде всего, оценим точность средних значений испарения и осадков, точность которых особенно осадков для многих архивов реанализа до настоящего времени остается на низком уровне [6, 7]. Для этого воспользуемся их сравнением с «эталонными» значениями, рассчитанными в работе [8] по данным 43 моделей проекта SMIP5 (E – 133 см, P – 121 см). Нетрудно видеть, что их различия с оценками в табл. 1 малы, что повышает степень доверия к ним. Другим важным параметром является величина тренда. Однако «эталонных» оценок тренда для E и P нет. Косвенной оценкой их точности может служить тренд в эффективном испарении $E-P$, который непосредственно влияет на рост (уменьшение) уровня Мирового океана. Например, тренд в $E-P$ по данным архива HOAPS-3 составляет 5,6 мм/год [7]. Отсюда следует, что уровнеобразующие факторы должны обеспечить рост УМО, равный $3,2 + 5,6 = 8,8$ мм/год. Это совершенно не соответствует действительности. Из табл. 1 видно, что тренд в $E-P$ отрицательный, т. е. 1,0 мм/год представляет вклад эффективного испарения в рост УМО.

Дополнительно в табл. 1 приводятся оценки индекса тренда, который представляет собой отношение размаха тренда (a_1n) к его среднему значению ($X_{ср}$) и выражается в условных единицах [9], т.е.

$$I_{тр} = 100 a_1n / X_{ср}, (1)$$

где a_1 – коэффициент уравнения линейного тренда ($X = a_1t + a_0$), характеризующий скорость изменения X в единицу времени t , n – период времени в годах. Индекс тренда – безразмерная величина, что очень удобно для сравнения характеристик разной размерности и даже одной размерности, но значительно различающихся по абсолютной величине.

Как видно из табл. 1 индексы тренда ТВ и ТПО значительно меньше $I_{тр}$ компонент влагообмена, особенно осадков. Это свидетельствует об их более быстрых темпах роста по сравнению с ТВ. При образовании осадков происходит выделение огромного количества тепла, которое непосредственно расходуется на нагревание атмосферы, т.е. по сути тренд в осадках участвует в формировании тренда в ТВ. С учетом скрытой теплоты L тренд в осадках в единицах выделяемой энергии составляет $0,32 \text{ Вт/м}^2$, что статистически значимо превышает радиационный форсинг всех парниковых газов, исключая CO_2 . Вклад тренда осадков в радиационный форсинг CO_2 для современного глобального потепления составляет 45 %. Отсюда следует, что осадки могут играть важное значение в потеплении климата.

Таблица 1

Статистические характеристики глобальной системы океан-атмосфера за период 1979–2019 гг.

Характеристика	ТВ	ТПО	Е	Р	Е-Р	ВА
среднее	18,1 °С	18,6 °С	1422 мм	1310 мм	112 мм	28,1 мм
СКО	0,16 °С	0,16 °С	47,4 мм	58,4 мм	33,2 мм	0,35 мм
Величина тренда	0,011 °С/год	0,011 °С/год	3,28 мм/год	4,29 мм/год	-1,01 мм/год	0,020 мм/год
Индекс тренда, %	2,5	2,5	9,4	13,4	-37,0	2,9
R^2	0,67	0,71	0,71	0,73	0,66	0,31

Приведенные в табл. 1 линейные тренды дают лишь общую «генеральную» тенденцию (представление) развития процессов во времени за период 1979–2020 гг. и не отражают их локальной динамики. Поэтому обратимся к межгодовому ходу стандартизированных и осредненных по пятилетиям временных рядов характеристик, представленных в табл. 1 (рис. 1). Очевидно, в качестве переломной точки, от которой начинается формирование тренда, можно принять наинизший экстремум временного ряда. Как видно из рис. 1 для испарения и осадков – это 1983 г., для ТПО – 1984 г., для ТВ и ВА – 1994 г. Налицо существенное расхождение, причем рост компонент влагообмена опережает рост ТВ на 10 лет. Кроме того, из рис. 1 видно, что начиная с 2002 по 2008 гг. отмечалось резкое уменьшение количества осадков, размах которого составил 0,11 мм/сутки или 44,4 % от предыдущего роста осадков за период 1983–2002 гг. Температура воздуха росла до 2004 г., после чего она слегка уменьшилась к 2010 г. на 0,02 °С. За этот же период ТПО уменьшилась на 0,07 °С.

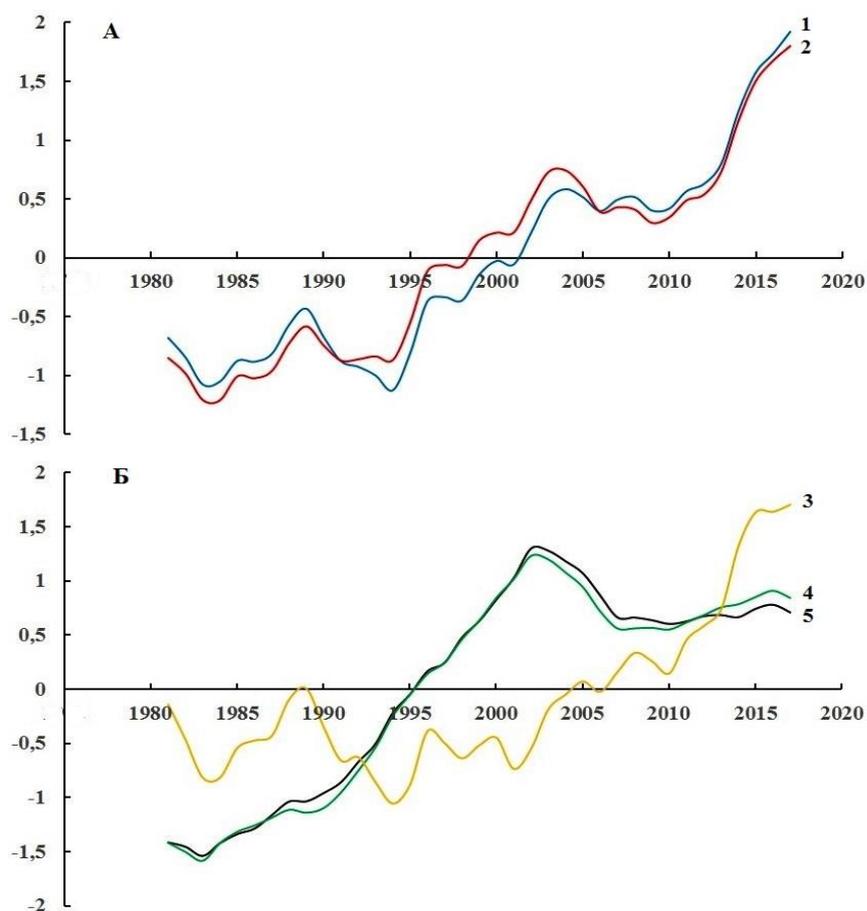


Рис. 1. Межгодовой ход стандартизированных и сглаженных по пятилетиям годовых характеристик глобальной системы океан-атмосфера за период 1979–2019 гг. А) 1 – ТВ, 2 – ТПО; Б) 3 – ВА, 4 – Р, 5 – Е

Итак, выполненные расчеты свидетельствуют, что изменчивость вертикального влагообмена определяется процессами крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой и не является следствием глобального потепления. Скорее, наоборот, осадки принимают непосредственное значение в нагревании атмосферы, причем этот эффект достигает 45 % от вклада CO_2 в парниковый эффект.

Как было указано во введении, в глобальном потеплении главенствующей является положительная обратная связь между влагосодержанием атмосферы (ВА) и температурой воздуха (ТВ). Проблема в том, что, по мнению экспертов МГЭИК, [10] *увеличение концентрации водяного пара является ключевым следствием, но не причиной процесса глобального потепления и, следовательно, полностью обусловлено положительной обратной связью между ними*. Отсюда становится понятным, что полностью игнорируются изменения ВА за счет естественных причин, а именно, за счет вариабельности компонентов водного баланса атмосферы.

В работе [4] по данным о ВА из архива PMWC [11] и ТВ из архива Reanalysis-2 [5] за период 1988–2016 гг. показано:

- при повышении ТВ на 1 °С, ВА повышается на 10 %, что не соответствует уравнению Клаузиуса-Клапейрона;

- безразмерный индекс тренда ВА (5,9 %) почти в 2 раза выше аналогичного индекса тренда в ТВ (3,1 %), причем повышение индекса тренда ВА идет более быстрыми темпами по сравнению с индексом тренда для ТВ.

Обратимся вначале к меридиональному распределению трендов ВА и ТВ для 10–градусных широтных зон МО (рис. 2). Нетрудно видеть, что в южном полушарии тренды значительно меньше, чем в северном. При этом в зоне 0–20° ю.ш. они незначимы для уровня значимости $\alpha=0,05$ по критерию Стьюдента. Однако в северном полушарии тренды ТВ и ВА носят противоположный характер. Если для ТВ максимальные тренды свойственны приполярным районам (60°–70° с.ш.) с их резким падением к южным широтам, то для ВА наоборот, максимальные тренды отмечаются в низких широтах (0–20° с.ш.), которые затем медленно уменьшаются по направлению к северным широтам.

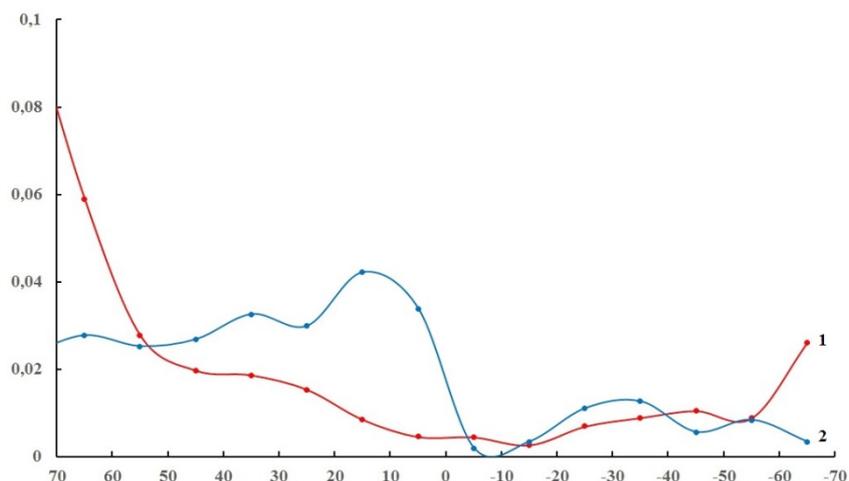


Рис. 2. Меридиональный профиль трендов ТВ ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$) и ВА ($\text{мм}/\text{год}$) для 10-градусных широтных зон Мирового океана. 1 – ТВ, 2 – ВА

В работе [12] показано, что формирование меридионального профиля парникового эффекта (ПЭ) при ясном небе, максимум которого отмечается в низких широтах, является результатом совместного действия годового хода ТВ и ВА, причем влияние их проявляется раздельно. В низких широтах изменчивость величины ПЭ в доминирующей степени определяется ВА, а в умеренных и высоких широтах в основном годовым ходом температуры. Отсюда следует, что максимальные значения ПЭ обусловлены ВА, а не ТВ.

Связь между годовыми значениями ТВ и ВА хорошо выражена (рис. 3), но ее характер существенно различен в разные промежутки времени. Как видно из рис. 3 в течение 1979–1993 гг. в межгодовом ходе ТВ и ВА отмечается отрицательный тренд, причем в ВА он несколько больше. Начиная с 1994 г. начинается резкий рост ТВ и ВА, причем теснота связи между ними становится меньше. Характеристики трендов представлены в табл. 2.

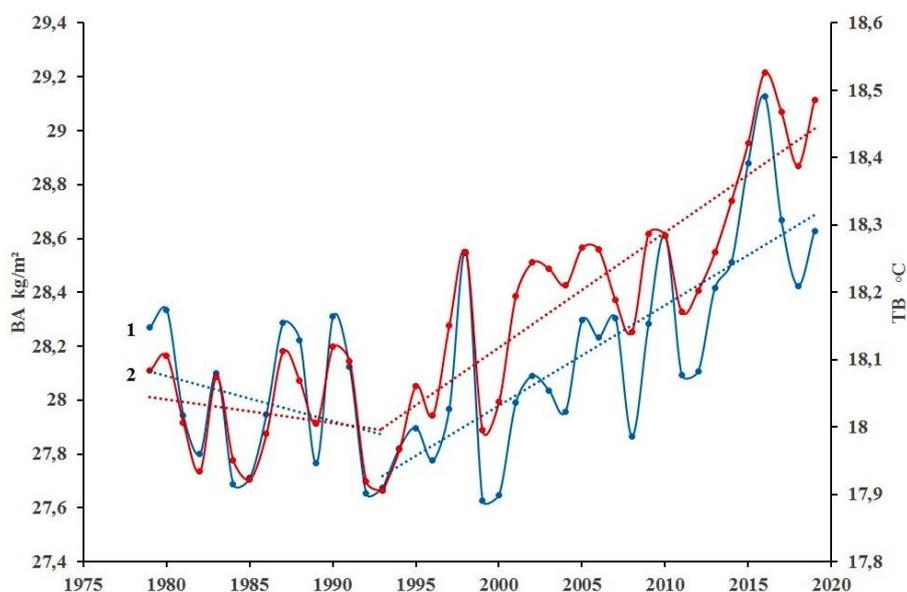


Рис. 3. Межгодовой ход годовых значений влагосодержания атмосферы (1) и температуры воздуха (2) над Мировым океаном в течение 1979–2019 гг.

Оценки характеристик трендов ТВ и ВА для различных интервалов времени

Промежуток времени, годы	Характеристика	Величина тренда	Коэффициент детерминации	Индекс тренда, %
1979–1993	ТВ	-0,003 °С/год	0,04	-0,28
	ВА	-0,017 мм/год	0,08	-0,92
1994–2019	ТВ	0,016 °С/год	0,70	2,32
	ВА	0,037 мм/год	0,55	3,45

Действительно, из табл. 2 следует, что отрицательные тренды в первый промежуток времени тренд являются незначимыми, причем индекс тренда в ВА в 3 раза больше индекса тренда в ТВ. Для периода сильного потепления индексы тренда увеличиваются на порядок, но при этом сохраняется заметное превышение $I_{тр}$ ВА над ТВ.

Для рассматриваемых промежутков времени были рассчитаны уравнения регрессии между ВА и ТВ:

$$ВА = 3,12ТВ - 28,29 \text{ (1979–1993 гг.)}$$

$$ВА = 2,33ТВ - 14,37 \text{ (1994–2019 гг.)}$$

Для первого промежутка времени $R^2 = 0,91$, для второго – $R^2 = 0,83$. Соответственно среднеквадратические ошибки моделей равны 0,25 мм и 0,35 мм. Отсюда видно, что для первого промежутка времени при отсутствии трендов качество связи между ВА и ТВ даже выше.

Используя данные уравнения легко рассчитать изменение ВА при изменении ТВ на 1 градус. В первом случае оно составляет 3,1 мм или 11,0 %, во втором – 2,4 мм или 8,3 %. Для доказательства того, что водяной пар является лишь ключевым следствием процесса глобального потепления, экспертами МГЭИК обычно делается ссылка на уравнение Клаузиуса-Клапейрона (УКК), которое связывает насыщающую упругость водяного пара с температурой воздуха. Действительно, из этого уравнения следует, что при повышении средней глобальной температуры воздуха на 1 градус насыщающая упругость водяного пара повышается на 6,5 % [13, 14]. Но следует понимать, что УКК является чисто термодинамическим и не описывает реальную атмосферу. Кроме того, насыщающая упругость водяного пара – это не эквивалент ВА. Даже в предположении одностороннего влияния ТВ на ВА из указанных выше уравнений следует, что при повышении ТВ на 1 °С ВА повышается существенно больше, чем на 6,5 %. А это не соответствует УКК. Однако никакого одностороннего влияния ТВ на ВА нет и не может быть в принципе, ибо формирование ВА происходит в результате вертикального влагообмена атмосферы с океанической поверхностью. При этом в соответствии с уравнением глобального атмосферного баланса влаги изменения ВА определяются исключительно разностью глобальных величин испарения и осадков или, в первом приближении, разностью испарения и осадков над Мировым океаном. Именно это игнорируется экспертами МГЭИК.

Итак, достаточно определенно можно утверждать, что влагосодержание атмосферы является климатообразующим фактором и через парниковый эффект оказывает существенное влияние на глобальное потепление.

Заключение

Антропогенная гипотеза глобального потепления является в зарубежных исследованиях «священной коровой». Мощное финансовое обеспечение стимулирует публикацию огромного числа работ в ее поддержку. Но когда МГЭИК делает вывод, что с вероятностью 95–100% влияние человека является доминирующей причиной глобального потепления, то это означает кризис климатологии, ее застой. Антропогенная ангажированность МГЭИК становится тормозом развития климатологии. Тем не менее, даже использование продвинутых архивов реанализа, созданных, в том числе для поддержки антропогенной гипотезы, свидетельствуют о наличии многих фактов против этой гипотезы. В данной работе на основе известного американского архива NCEP/NCAR Reanalysis-2 показано:

- тренд в осадках в единицах выделяемой энергии составляет 0,34 Вт/м², что превышает радиационный форсинг всех парниковых газов, исключая СО₂.

- изменчивость вертикального влагообмена определяется процессами крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой и не является следствием глобального потепления;
- индексы тренда в компонентах влагообмена значительно превышают аналогичный индекс в ТВ и ТПО, что свидетельствует об их более быстром росте по сравнению с ТВ;
- доминирующей причиной формирования парникового эффекта при ясном небе, максимум которого отмечается в низких широтах, является ВА;
- подтверждается на более обширном материале, что при повышении ТВ на 1 °С ВА повышается более чем на 6,5 %, что не соответствует уравнению Клаузиуса-Клапейрона.

Полученные результаты подтверждают, что формирование глобального потепления обусловлено процессами крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей. При этом значительное влияние на глобальное потепление оказывает рост выделяемого тепла при выпадении осадков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания FSZU-2020-0009 «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

ЛИТЕРАТУРА

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Гор А. Неудобная правда. Глобальное потепление. – СПб.: Амфора, 2007. 327 с.
3. Кондратьев К.Я., Донченко В.К. Экодинамика и геополитика Т.1. Глобальные проблемы. – СПб., 1999. – 1032 с.
4. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 243–251.
5. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bul. of the Atmos. Met. Soc. 2002. 83. P. 1631–1643.
6. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. СПб: Изд. РГТМУ, 2012. 260 с.
7. Malinin V.N., Gordeeva S.M. Variability of Evaporation and Precipitation over the Ocean from Satellite Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53, no. 9. P. 934–944. doi: 10.1134/S0001433817090195/
8. Wild M., Folini D., Hakuba M.Z., Schär C., Seneviratne S.I., Kato S., Rutan D., Ammann C., Wood E.F., König-Langlo G. The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models // Climate Dynamics. 2015. V.44, N 11-12. P. 3393–3429.
9. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость влагосодержания над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3–11.
10. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
11. Hilburn K. A. The Passive Microwave Water Cycle Product. REMSS Tech. Rpt. 072409. 2009. P. 1-30.
12. Webb M.J., Slingo A., Stephens G.L. Seasonal variations of the clear-sky green-house effect: the role of changes in atmospheric temperatures and humidities // Clim. Change. 1993, Vol. 9, No3, P. 117–130.
13. Brutsaert W. Global land surface evaporation trend during the past half century: Corroboration by Clausius-Clapeyron scaling // Advances in Water Resources. 2017. Vol. 106. P. 3–5.
14. O’Gorman, P. A., C. J. Muller. How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius-Clapeyron scaling in climate change simulations? // Environmental Research Letters. 2010. Vol.5. N.2. P. 025207.

Огибалов В.П.^{1,2,3}

Радиационное выхолаживание нижней термосферы в ИК полосах CO₂ при учёте электронно-колебательного переноса энергии от O(¹D)

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова»
Россия, 198035, Санкт-Петербург, Двинская ул., дом 5/7

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова»
Россия, 198264, Санкт-Петербург, Институтский пер., дом 5 литер Б

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
E-mail: vpo563@mail.ru

Фотодиссоциация молекул O₂ и O₃ при поглощении солнечного УФ излучения является одним из самых важных механизмов нагревания атмосферы Земли. Одним из продуктов этого процесса является атомарный кислород в состоянии ¹D. В модель излучения средней и верхней атмосферы Земли в ИК колебательно-вращательных полосах молекул CO₂ при нарушении колебательного ЛТР был включён механизм возбуждения колебательных состояний CO₂ за счет электронно-колебательного (E-V) переноса поглощённой УФ солнечной энергии в каналах O(¹D) → (N₂(v), v=1-5 и O₂(v), v=1-4) → CO₂(v₃). Установлено, что включение этого механизма приводит к значительному увеличению населённостей возбужденных колебательных состояний молекул N₂, O₂ и CO₂ с последующим заметным увеличением скорости выхолаживания атмосферы на высотах 90-110 км за счет переноса излучения в ИК полосах CO₂. Для условий полудня на экваторе для весеннего равноденствия при среднем уровне солнечной активности (F_{10.7}=90) около 23–25% УФ энергии, запасаемой в виде O(¹D), передается в состояния N₂(v) и O₂(v) с последующей передачей в состояния CO₂(v₃) вследствие межмолекулярного V-V обмена энергией возбуждения. Затем большая часть переданной энергии излучается из атмосферы, в основном, в фундаментальном переходе 4.3 мкм полосы главного изотополога ¹²C¹⁶O₂: высвечивается 90, 87, 82, 60 и 25 процентов на высотах 90, 95, 100, 105 и 110 км, соответственно. Это обеспечивает увеличение скорости выхолаживания нижней термосферы (максимально порядка 6.0 К/сутки на 105 км). Полученная оценка скорости выхолаживания выше, чем сообщалось в предыдущих исследованиях.

Ключевые слова: перенос излучения; нарушение ЛТР; полосы углекислого газа; нижняя термосфера.

Vladimir P. Ogibalov^{1,2,3}

Improved Estimation of The Infrared CO₂ Band Cooling Rate in The Lower Thermosphere Due To E-V Energy Transfer From O(¹D)

¹ Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping
Russia, 198035, Saint-Petersburg, Dvinskaya str., 5/7

² Saint-Petersburg State Forest Technical University
Russia, 198264, Saint-Petersburg, Institutskiy per., 5 letter B

³ Saint-Petersburg State University
Russia, 199034, Saint-Petersburg, Universitetskaya nab., 7/9
E-mail: vpo563@mail.ru

A mechanism of excitation of the CO₂ vibrational states due to E-V energy transfer through a chain O(¹D) → (N₂(v), v=1-5 and O₂(v), v=1-4) → CO₂(v₃) was updated in the non-LTE model for the CO₂ infrared emissions in the Earth atmosphere. It was found that including this mechanism results in significant increase of populating the excited vibrational states of N₂, O₂ and CO₂ followed by *visible increase* of cooling rate due to transfer of radiation in the CO₂ bands in the altitude region of 90-110 km. Main inferences are as follows. For noon conditions at the

equator for spring equinox under average level of solar activity ($F_{10.7}=90$), about 23–25 per cent of flux of solar UV energy, which spent to excitation the $O(^1D)$ state after photodissociation of ozone and molecular oxygen, transfers to both $N_2(v)$ and $O_2(v)$ vibrational states due to E-V energy exchange during collisions. After that, a part of this flux transfers to the $CO_2(v_3)$ states due to intermolecular V-V energy exchange. Finally, the energy is radiated from the atmosphere mainly in the $4.3\mu m$ fundamental band of the CO_2 principal isotope with an efficiency of 0.9, 0.87, 0.82, 0.6, and 0.25 at the altitudes of 90, 95, 100, 105, and 110 km, respectively. This provides an additional cooling of the MLT region with a maximum rate of order 6.0 K/day at 105 km. Such an estimation is more larger than it had been obtained in previous investigations. So, comparing to the most recent estimations of the $15\mu m$ CO_2 band cooling rate, this seems to be a valuable additional source of cooling of the lower thermosphere comparing to the most recent estimations of the $15\mu m$ CO_2 band cooling rate.

Keywords: radiative transfer; non-LTE; carbon dioxide bands; lower thermosphere.

Введение

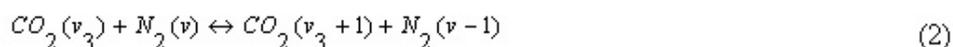
Редкость молекулярных столкновений вследствие низкой плотности воздуха на высотах мезосферы и нижней термосферы (МНТ), с одной стороны, и высокая скорость возбуждения колебательных состояний молекул CO_2 при поглощении солнечного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне (БИК), с другой стороны, приводят к нарушению больцмановского распределения в величинах концентрации (населённостях) колебательных состояний молекул углекислого газа, т.е. имеет место нарушение локального термодинамического равновесия по колебательным степеням свободы молекул (колебательное НЛТР). Поглощение солнечного излучения в БИК диапазоне спектра имеет следствием сильное возбуждение (накачку) высоких возбуждённых колебательных состояний молекул CO_2 в слое МНТ. В результате населённости молекул в этих состояниях днем оказывается много больше, чем ночью. Учёт поглощения солнечного излучения в моделях колебательного НЛТР сложностей не вызывает.

Высотный уровень в атмосфере Земли, выше которого нельзя пренебрегать нарушением ЛТР при оценке населённостей колебательных состояний молекул CO_2 , варьируется в зависимости от длины волны радиационных переходов, в которых происходит возбуждение этих состояний при поглощении солнечного БИК излучения из основного состояния молекул. Необходимость учёта колебательного НЛТР в земной атмосфере означает, что для решения задачи переноса излучения (ПИ) в колебательно-вращательных (К-В) полосах молекул CO_2 и необходимо совместно решать уравнения переноса излучения (УПИ) и систему уравнений стационарности (УС) для нахождения величин неравновесных населённостей колебательных состояний, которые связаны между собой радиационными и столкновительными переходами. Сложность решения такой задачи состоит также и в том, что необходимо учитывать большое число колебательных состояний нескольких изотопологов молекулы CO_2 , а перенос излучения необходимо учитывать для большого числа К-В линий.

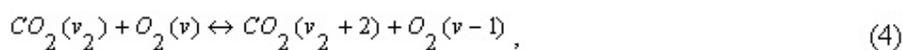
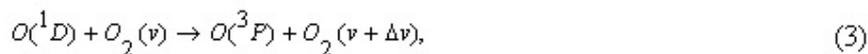
При моделировании энергетического баланса нижней термосферы (НТ) необходимо учитывать несколько механизмов нагревания и охлаждения. Среди них в указанном высотном слое важным механизмом является дезактивация атомов $O(^1D)$, которые являются одними из продуктов фотодиссоциации озона и молекулярного кислорода. Несмотря на то, что атомы $O(^1D)$ являются малой составляющей в атмосфере, они имеют большое значение для формирования энергетического баланса в НТ. Энергия возбуждения атомов $O(^1D)$ в конечном счёте частично переходит в кинетическую, а оставшаяся её часть излучается из атмосферы в разных спектральных диапазонах.

Несколько исследований были посвящены тому, каким образом расходуется энергия, запасаемая в состояниях $O(^1D)$. Одной из наиболее известных является работа [1], в которой, однако, использована уже устаревшая модель. (Кроме того, работа [1] содержит неточности в значениях используемых констант скорости процессов.) Поэтому численные результаты, полученные в работе [1], нуждаются в обновлении.

Известно, что атомы $O(^1D)$ являются одними из основных внешних источников колебательной энергии для состояний $N_2(v)$ и $O_2(v)$ в слое МНТ в дневное время. Эти состояния тесно связаны с колебательными состояниями молекул CO_2 посредством межмолекулярного колебательно-колебательного (V-V) обмена энергией. Таким образом, внешний источник молекул CO_2 , возбуждённых по валентному антисимметричному колебанию v_3 , обеспечивается цепочкой реакций



и уже включается в НЛТР модели для колебательных состояний молекул CO_2 в атмосфере Земли (см. ссылки в [2-3]). Однако до сих пор электронно-колебательный (E-V) обмен (1) учитывался только в случае $v=0$. Другой возможный источник колебательного возбуждения молекул CO_2 , возбуждённых по деформационному колебанию ν_2 , обеспечивают процессы



которые впервые были учтены в [2-3].

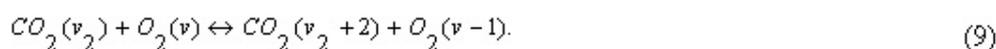
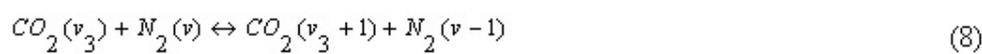
В единственном известном автору исследовании [4], в котором учитывалась потеря энергии возбуждения атомов $\text{O}(^1D)$ за счёт ИК эмиссии молекулами $\text{CO}_2(\nu_3)$ в диапазоне полосы 4,3 мкм, приводится оценка, что максимальная потеря энергии $\text{O}(^1D)$, поступающей в резервуар $\text{CO}_2(\nu_3) - \text{N}_2(v)$, составляет менее 0.15 К/сутки на высоте около 105 км. В настоящее время авторы работы [4] значительно снизили эту оценку, т.к. в последней модификации [5] их НЛТР модели для молекул CO_2 было отмечено, что в [4] количество возбужденных молекул $\text{N}_2(v)$, образующихся в результате реакции (1), следует уменьшить в 6.8 раза вследствие неправильного понимания.

Целью настоящего сообщения является представление обновленной оценки скорости выхолаживания в нижней термосфере в ИК полосах CO_2 за счёт подключения внешнего источника (процессы (1)-(4)) колебательного возбуждения молекул CO_2 от атомов $\text{O}(^1D)$ на основе модели, изложенной в [2-3].

Описание модели

Модель [2-3] включает в себя набор из 321 возбуждённых колебательных состояний, принадлежащих 7 изотопологам CO_2 и 779 радиационным колебательным переходам (около 100000 линий). Состоянием с наибольшей энергией возбуждения с энергией около 9500 см^{-1} является 20^{03} основного изотополога $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ (далее обозначается 626). Развита в работе [6] НЛТР модель для полос CO_2 в данном исследовании была дополнена обновленной моделью внешнего источника возбуждения молекул CO_2 от атомов $\text{O}(^1D)$, а именно:

- 1) канал переноса энергии $\text{O}(^1D) \rightarrow \text{O}_2(v)$ включён в НЛТР модель впервые (процессы (3)-(4));
- 2) сейчас в НЛТР модель включены 5 низших возбужденных колебательных состояний молекулы N_2 и 4 состояния молекулы O_2 , что позволяет учесть V-V процессы обмена колебательной энергией



(Заметим, что во всех ранних НЛТР моделях [2-5] рассматривались только возбужденные состояния $\text{N}_2(1)$ и $\text{O}_2(1)$);

- 3) согласно [7] принято следующие предположения: (а) эффективность E-V процессов переноса энергии равна до 30% для обоих процессов (1) и (3) и (б) квантовый выход в этих процессах равен $f_{\text{N}_2(v)}=0.2$ для $\Delta v=v''v'=0 \div 5$ и $f_{\text{O}_2(v)}=0.25$ для $\Delta v=v''v'=0 \div 4$.

Результаты

Населённости колебательных состояний. При использовании описанной выше модели внешнего источника колебательного возбуждения молекул CO_2 от атомов $\text{O}(^1D)$, была решена задача колебательного

НЛТР для полос CO_2 для параметров атмосферы, соответствующих экватору в день весеннего равноденствия при $F_{10.7}=90$. Неравновесные населённости некоторых возбужденных состояний изотополога 626, а также состояний $\text{N}_2(1)$ и $\text{O}_2(1)$ приведены на рис. 1 в виде колебательных температур T_v .

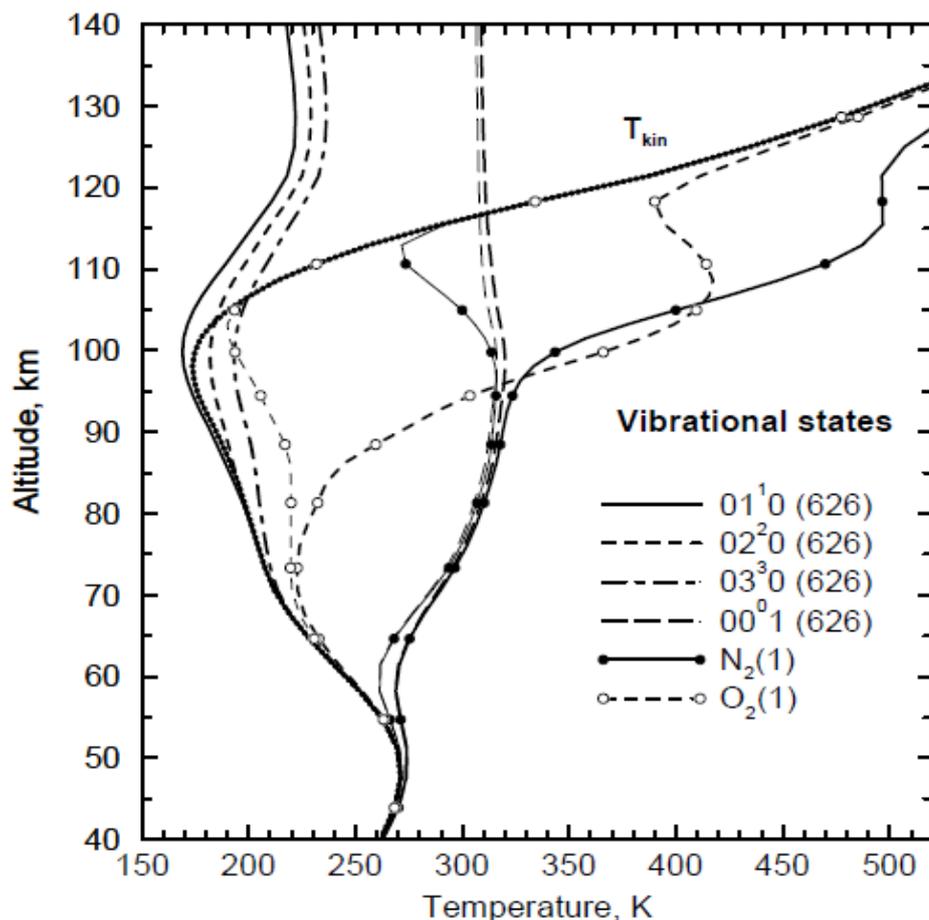


Рис. 1. Неравновесные населённости некоторых возбужденных состояний изотополога 626, а также состояний $\text{N}_2(1)$ и $\text{O}_2(1)$ для условий: экватор, весеннее равноденствие, $F_{10.7}=90$. Тонкие кривые соответствуют случаю, когда учитывается только поглощение солнечного БИК излучения. Толстые кривые соответствуют случаю, когда добавляется внешний источник колебательного возбуждения от атомов $\text{O}(^1\text{D})$ (процессы (1)-(4))

Можно сделать вывод, что подключение внешнего источника от атомов $\text{O}(^1\text{D})$ приводит к сильному увеличению населённостей колебательных состояний $\text{N}_2(1)$ и $\text{O}_2(1)$ и заметному увеличению населённости состояния $\text{CO}_2(00^0_1)$ (радиационный переход из этого состояния в основное соответствует фундаментальному переходу 4.3 мкм полосы). В максимуме это увеличение достигает:

- до 100 К и 215 К на высоте $z=105$ км для состояний $\text{N}_2(1)$ и $\text{O}_2(1)$, соответственно;
- до 5 К при $z=100$ км для состояния $\text{CO}_2(00^0_1)$.

Что касается состояний молекул CO_2 , возбуждённых по деформационному колебанию ν_2 , то перенос энергии от атомов $\text{O}(^1\text{D})$ оказывает на них незначительное влияние.

Лучистое выхолаживание. Методология расчета дивергенции потока излучения (т. е. скорости лучистого нагревания/выхолаживания) в К-В полосах CO_2 описана в [8], а результаты расчёта представлены на рис. 2 также для случаев, соответствующих подключению или отсутствию переноса энергии от атомов $\text{O}(^1\text{D})$. Также для наглядности рассчитывались скорость переноса энергии к атомам $\text{O}(^1\text{D})$ вследствие фотодиссоциации молекул O_3 и O_2 и скорость переноса энергии, передаваемой на состояния $\text{N}_2(v)$ и $\text{O}_2(v)$ вследствие E-V обмена с атомами $\text{O}(^1\text{D})$. Величины второй скорости меньше примерно в 4.2 раза, чем величины первой по всей нижней термосфере. Это означает, что около 22% энергии, запасаемой атомами $\text{O}(^1\text{D})$ вследствие фотодиссоциации молекул O_3 и O_2 , передается в резервуар колебательной энергии $\text{CO}_2(\nu_3)\text{-N}_2(v)$.

Приведённые на рис. 2 результаты являются мгновенными значениями и соответствуют условиям солнечного зенитного угла $CЗУ=0^\circ$, поэтому их следует рассматривать как верхнюю оценку. Можно видеть, что увеличение скорости лучистого выхолаживания в К-В полосах молекул CO_2 наблюдается между 90 и 120 км и достигает в максимуме 6 К/сутки на высоте 105 км. Причем 80% такого дополнительного охлаждения обеспечивается процессом (1) и только 20% процессом (3).

С другой стороны, максимальная доля энергии, которая запасается в атомах $O(^1D)$ и которая в конечном итоге излучается из атмосферы в основном в диапазоне 4.3 мкм полосы молекул CO_2 , составляет порядка 90% и имеет место на высоте 90 км. Тем не менее, эта доля составляет около 60% на высоте 105 км, где увеличение скорости лучистого выхолаживания в К-В полосах CO_2 достигает максимальных значений. Можно сделать вывод, что доля солнечной УФ энергии, передающейся на атомы $O(^1D)$ и затем излучающейся из атмосферы в К-В полосах молекул CO_2 , составляет порядка 12–15% и 22–23% на высотах 105 км и 90 км, соответственно.

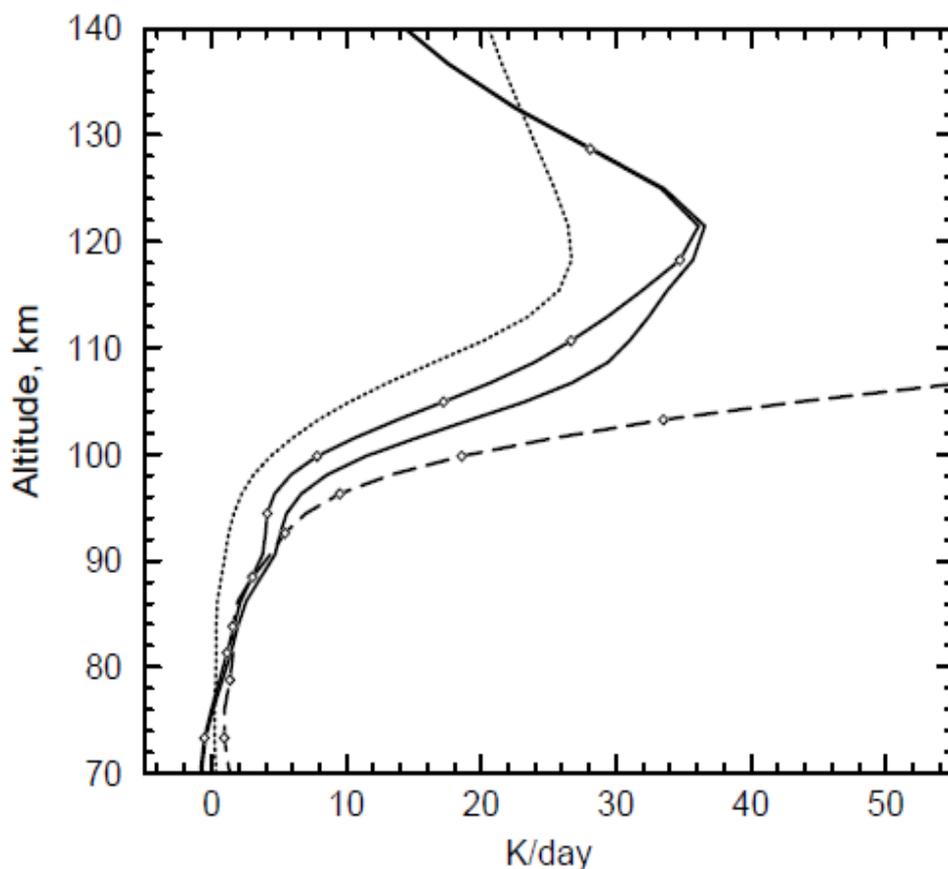


Рис. 2. Скорость лучистого выхолаживания (суммарная по всем учитываемым в НЛТР модели К-В полосам молекул CO_2) для случаев подключения переноса энергии от атомов $O(^1D)$ (сплошная кривая) и его отсутствия (сплошная кривая с ромбами) для условий: экватор, весеннее равноденствие, $F_{10.7}=90$. Для наглядности приведены (с противоположным знаком) скорость переноса энергии к атомам $O(^1D)$ вследствие фотодиссоциации молекул O_3 и O_2 (пунктирная кривая с ромбами) и скорость переноса энергии, передаваемой на состояния $N_2(v)$ и $O_2(v)$ вследствие E-V обмена с атомами $O(^1D)$ (пунктирная кривая)

Заключение

Основные выводы состоят в следующем.

- 1) После усреднения за сутки увеличение скорости лучистого выхолаживания в К-В полосах молекул CO_2 механизма переноса энергии от атомов $O(^1D)$ составляет в максимуме 2.4 К/сутки на высоте порядка 106 км. Эта оценка значительно больше, чем дано в работе [4].
- 2) Оценка скорости выхолаживания в 15 мкм полосе CO_2 , полученная в работе [8], составляет порядка 17 К/сутки на 105 км. Таким образом, увеличение скорости лучистого выхолаживания в К-В полосах молекул CO_2 за счёт подключения механизма переноса энергии от атомов

O(¹D) может составлять порядка 14% от скорости выхолаживания в 15 мкм полосе CO₂. Это может быть полезно для моделирования общей циркуляции в нижней термосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harris R.D., Adams G.W. Where does the O(¹D) energy goes? // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. № A6. P. 4918–4928.
2. Shved G.M., Kutepov A.A., Ogibalov V.P. Non-Local thermodynamic equilibrium in CO₂ in the middle atmosphere. I. Input data and populations of the ν_3 mode manifold states // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998. V. 60. P. 289–314.
3. Ogibalov V.P., Kutepov A.A., Shved G.M. Non-Local thermodynamic equilibrium in CO₂ in the middle atmosphere. II. Populations of the $\nu_1\nu_2$ mode manifold states // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998. V. 60. P. 315–329.
4. López-Puertas M., López-Valverde M.A., Taylor F.W. Studies of solar heating by CO₂ in the upper atmosphere using a non-LTE model and satellite data // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47. № 7. P. 809–822.
5. López-Puertas M., Zaragoza G., López-Valverde M.A., Taylor F.W. Non local thermodynamic equilibrium (LTE) atmospheric limb emission at 4.6 μm . 1. An update of the CO₂ non-LTE radiative transfer model // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D7. P. 8499–8513.
6. Ogibalov V.P., Shved G.M. Natural population inversion for the CO₂ vibrational states in the Earth's atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. V. 62. № 11. P. 993–997.
7. Alad'ev G.A., Kirillov A.S. Vibrational kinetics of N₂ and O₂ in the high-latitudinal upper atmosphere // *Cosmich. Issled.* 1997. V. 35. № 3. P. 227–234.
8. Ogibalov V.P., Fomichev V.I., Kutepov A.A. Radiative heating effected by infrared CO₂ bands in the middle and upper atmosphere // *Izvestiya, Atmos. Ocean. Phys.* 2000. V. 36. № 4. P. 454–464.

Огурцов М.Г.

Солнечная активность и климат Земли – современные данные

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26
E-mail: maxim.ogurtsov@mail.ioffe.ru

В работе приводятся имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные свидетельства влияния солнечной активности на нижнюю атмосферу и климат Земли. Рассматриваются предполагаемые физические механизмы солнечно-климатической связи. Обсуждаются результаты новейших лабораторных экспериментов. Приводятся долговременные реконструкции светимости Солнца и оценивается возможный вклад изменений солнечной активности в глобальное потепление последнего столетия.

Ключевые слова: солнечная активность, космические лучи, климат Земли.

Ogurtsov M.G.

Solar Activity And Terrestrial Climate – The Modern Data

Ioffe Institute
194021, St. Petersburg, Polytechnicheskaya 26
E-mail: maxim.ogurtsov@mail.ioffe.ru

Experimental evidences of solar activity influence on the lower atmosphere and terrestrial climate are reported. Potential physical mechanisms of the solar-climatic link are considered. The results of the up-to-date laboratory experiments are discussed. The long-term reconstructions of the total solar irradiance are shown. Possible contribution of solar activity to the global warming of the last century is evaluated.

Keywords: solar activity cosmic rays, climate.

Введение

Под солнечной активностью (СА) обычно понимается весь комплекс нестационарных процессов и явлений в атмосфере Солнца связанных с изменениями солнечных магнитных полей. Возникновение и дальнейшая временная эволюция солнечных пятен является основным и наиболее очевидным проявлением солнечной активности. Активность Солнца влияет на целый ряд процессов в гелиосфере и, как следствие, на физическое состояние околоземного пространства. На рисунке 1 показаны изменения параметров СА, включая число солнечных пятен и полную солнечная радиацию (ПСР), и, связанных с ними, геофизических факторов. Возможная связь СА с климатом Земли привлекает учёных на протяжении уже почти четырёх столетий. Немало свидетельств подобной связи получено в последнее время. В работах целого ряда исследователей показано, что наиболее вероятным физическим агентом, передающим воздействия СА на нижнюю атмосферу Земли, являются потоки солнечных космических лучей (СКЛ) и эффективно модулируемых активностью Солнца галактических космических лучей (ГКЛ) [1–4].

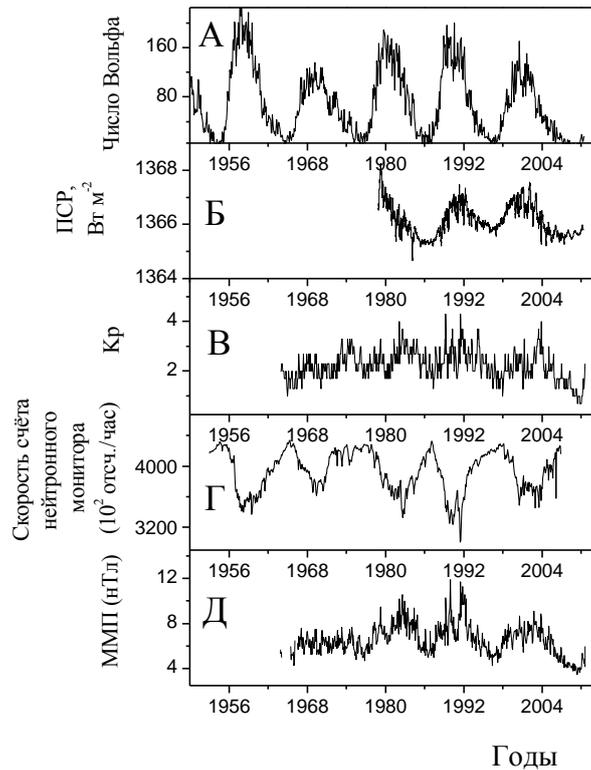


Рис. 1. А – Число Вольфа; Б – полная солнечная радиация по данным ACRIM; В – геомагнитный Kp индекс; Г – скорость счёта нейтронного монитора в Клаймэксе (39° N, 106 ° W, R_c=3 ГВ); Г – скорость солнечного ветра на орбите Земли; Д – напряжённость межпланетного магнитного поля на орбите Земли

Экспериментальные результаты

Гипотеза о влиянии ГКЛ на земной климат получила новый импульс в конце 90-х в результате эксперимента ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project). Аппаратура спутников, задействованных в этом эксперименте, регистрировала все типы облаков и днём и ночью практически над всей поверхностью Земли. Результаты этих измерений приведены на рисунке 2. Как видно из рисунка 2 до начала нулевых годов нижняя облачность хорошо коррелировала с вариациями интенсивности ГКЛ. Изменение облачного покрова в течение солнечного цикла достигало 6%. Это вызвало значительный энтузиазм у ряда гелиогеофизиков [5–6]. В качестве наиболее перспективного физического механизма обнаруженной взаимосвязи была предложена ион-индуцированная нуклеация.

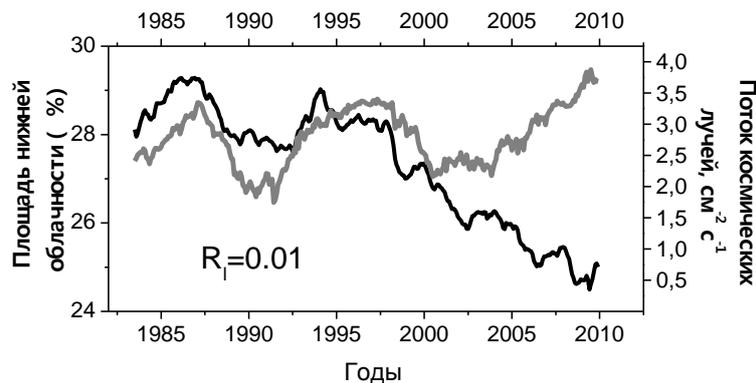


Рис. 2. Чёрная линия – площадь поверхности Земли, покрытая облачностью нижнего (< 3.2 км) яруса (ISCCP); Серая линия – поток космических лучей над Мурманском на высоте ≈25 км

В рамках данного механизма увеличение скорости генерации ионов вызывает увеличение скорости нуклеации – образования субкритических ($r < 1.5$ нм) кластеров, частично превращающихся в устойчивые частицы ($r > 1.5-2.0$ нм), представляющие собой зародыши атмосферного аэрозоля. Эти

нанокластеры, в свою очередь, могут за счёт дальнейших коагуляции и конденсации, превращаться в ядра конденсации облаков. Однако примерно в 2003 г. кривые изменений облачности и ГКЛ разошлись. Поэтому ряд авторов, исследовавших корреляцию между нижней облачностью и ГКЛ на интервале времени до 2008 гг., пришёл к выводу о незначительном воздействии ГКЛ на облачность и малом вкладе вариаций потока ГКЛ в изменения климата [7–8]. С другой стороны в работе [9] было предположено, что облачность испытывает влияние потока ГКЛ на всём временном промежутке 1983–2010 гг., но в 2003 году характер эффекта меняется. Можно отметить, что смена знака солнечно-космических корреляций со временем отмечалась и в других работах [4]. Если гипотеза о смене знака верна то ГКЛ, модулируемые СА, могли внести заметный вклад в потепление последних 30 лет [9]. Другим возможным механизмом, обеспечивающим солнечно-климатическую связь, является воздействие СА на глобальную электрическую цепь [10].

Результаты, полученные в рамках проекта ISCCP, значительно стимулировали интерес к вопросу о влиянии ионизации на образование аэрозолей в атмосфере. Как следствие, в последние 15 лет были проведены два крупных наземных эксперимента. Эксперимент CLOUD в ЦЕРНе производился с использованием установки, представляющей собой стальную цилиндрическую камеру диаметром 3 м, высотой 2.8 м и объёмом 26.1 м³. Сначала эта установка заполнялась очищенным увлажнённым воздухом, сернистым газом SO₂, озоном O₃ и парами аммиака NH₃. Источником ионизации служил пучок вторичных пионов с энергиями до 3 ГэВ, произведённый протонным синхротроном. Температура в камере менялась от -90 до 27° С. Условия в эксперименте ЦЕРНа были весьма близки к реальным атмосферным, что сделало возможным сопоставить скорость нуклеации наблюдаемую в эксперименте CLOUD со скоростью реально измеренной в нижней атмосфере. Эксперимент подтвердил влияние ионизации на скорость нуклеации, особенно при условиях, характерных для средней тропосферы ($T = -25^{\circ}\text{C}$, $RH = 38\%$, $[H_2SO_4] = 0.6-2 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$). При таких условиях скорость образования кластеров с диаметром 1.7 нм увеличивалась в 10 раз и более при скорости генерации ионов в камере, соответствующей ионизации галактическими космическими лучами [11]. Однако результат эксперимента при условиях нижней атмосферы оказался неожиданным. Зарегистрированная в камере скорость образования нанокластеров оказалась на 1–3 порядка ниже, наблюдаемой в реальной нижней атмосфере. Было сделано предположение о том, что в процессах нуклеации в атмосфере помимо SO₂, O₃ и NH₃ участвуют и органические примеси. Дальнейшие эксперименты подтвердили правоту данной гипотезы. Добавление в камеру незначительных количеств диметиламина C₂H₇N позволило увеличить скорость нуклеации до значений, соответствующих теоретическим оценкам и данным экспериментальных измерений [12, 13]. Эксперимент CLOUD в итоге фактически доказал возможность воздействия ГКЛ на состояние нижней атмосферы Земли. Однако расчёты с использованием моделей образования аэрозолей показали, что влияние ГКЛ конкретно на облачность невелико – изменения ионизации в течение солнечного цикла приводят к изменениям скорости генерации нанокластеров на несколько процентов, а концентрации ядер конденсации облаков лишь на 0.2–0.3% [14].

Наземный эксперимент SKY, проведённый в Датском Метеорологическом Институте, принес другие результаты. Датские исследователи использовали камеру объёмом 7 м³. Эту установку они заполняли воздухом с относительной влажностью 35–50%, сернистым газом и озоном. Температура поддерживалась на уровне 20–23 °С [15]. Этот эксперимент также подтвердил отчётливую зависимость скорость образования нанокластеров от ионизации. Однако, в отличие от эксперимента CLOUD, датские учёные обнаружили заметное влияние ионизации и на генерацию частиц со значительно большими размерами. Например, при усилении ионизации с 3 до 60 пар ионов×см⁻³×с⁻¹ концентрация аэрозолей с размерами до 60 нм, вполне способных служить ядрами конденсации облаков, увеличивалась почти на 20% [16]. Кроме того экспериментальные свидетельства процесса ион-индуцированной нуклеации были получены при помощи самолётных [17] и аэростатных [18] измерений.

СА может влиять на климат Земли и посредством вариаций светимости Солнца (ПСР). Мониторинг солнечной светимости с помощью спутниковой аппаратуры начался в 1978 г. и выявил 11-летнюю вариацию ПСР с амплитудой $\approx 2 \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$. Присутствуют ли в светимости Солнца более долговременные колебания сказать трудно. Тем не менее, уже появился целый ряд реконструкций солнечной постоянной, охватывающих несколько последних столетий. Некоторые из них приведены на рисунке 3.

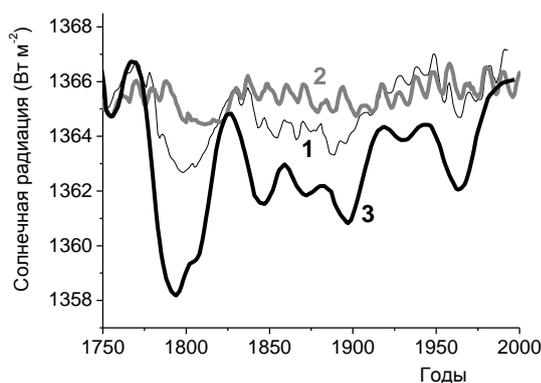


Рис. 3. Современные реконструкции солнечной радиации (светимости Солнца).

1 – Hoyt and Schatten [19]; 2 – Mordvinov et al. [20]; 3 – Beer et al. [21]

Из рисунка видно, что увеличение солнечной радиации в 20-м веке может достигать $1-3 \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$ т.е. способно обеспечить радиационный форсинг $0.18-0.52 \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$. С учётом климатической чувствительности $\lambda_c = 0.40-1.22 \text{ } ^\circ\text{C} \times \text{Вт}^{-1} \times \text{м}^2$ получаем, что увеличение светимости Солнца в последнее столетие способно вызвать подъём глобальной температуры на $0.05-0.70 \text{ } ^\circ\text{C}$. Таким образом, что вклад СА в глобальное потепление XX века, если он вообще существует, может быть как весьма значительным, так и пренебрежимо малым.

Выводы

С учётом полученных в последние 15–20 лет экспериментальных результатов и наблюдательных данных принципиальная способность СА влиять на состояние нижней атмосферы Земли может считаться практически доказанной. Однако степень этого влияния, по-прежнему, остаётся неясной. Оценить сколько-нибудь точно вклад СА в глобальное потепление последнего столетия также пока затруднительно. Дальнейшие наблюдения и эксперименты необходимы для ответа на указанные вопросы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // Геомагнетизм и Аэронаука. 1993. Т. 33. № 6. С. 35–40.
2. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Стратосферный механизм солнечного и антропогенного влияния на климат / В сб.: Солнечно-земные связи, погода и климат (ред. Б. Мак-Кормак и Т. Селига). М: Мир. 1982. С. 354–361.
3. Shumilov O.I., Vashenyuk E.V., Kasatkina E.A., Baidanov S.A. Increase of stratospheric aerosols after solar proton events. Atmospheric ozone / Proc. SPIE. 1993. V. 2047. P. 70–82.
4. Veretenenko S., Ogurtsov M. Regional and temporal variability of solar activity and galactic cosmic ray effects on the lower atmosphere circulation // Advances in Space Research. 2012. V. 49. P. 770–783.
5. Marsh N., Svensmark H. Cosmic rays, clouds and climate // Space Science Rev. 2000. V. 94. №1-2, P 215–230.
6. Palle E., Buttler C.J., O'Brien K. The possible connection between ionization in the atmosphere by cosmic rays and low level clouds // Journal of Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2004. V. 66, P. 1779–1790.
7. Sloan T., Wolfendale A.W. Testing the proposed causal link between cosmic rays and cloud cover. Environm. Res. Lett. 2008. V. 3. P. 024001.
8. Erlykin A. D., Wolfendale A. W. Cosmic Ray Effects on cloud cover and their relevance to climate change // Journal Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. V.73. P. 1681–1686.
9. Ogurtsov, M.G., Veretenenko, S.V. Possible contribution of variations in the galactic cosmic ray flux to the global temperature rise in recent decades // Geomagnetism and Aeronomy. 2017. V. 57. № 8. P. 886–891.
10. Tinsley B.A. The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics // Rep. Progr. Phys. 2008. V.71. No 6. P. 66801–66900.
11. Kirkby J., Curtius J., Almeida J. et al. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation // Nature. 2011. V. 476, P. 429–433.

12. Almeida J., Schobesberger S., Kürten A. et al. Molecular understanding of sulphuric acid–amine particle nucleation in the atmosphere // *Nature*. 2013. V. 502. P. 359–363.
13. Kürten A., Chenxi Li, Bianchi F. et al. New particle formation in the sulfuric acid–dimethyl-amine–water system: reevaluation of CLOUD chamber measurements and comparison to an aerosol nucleation and growth model // *Atmos. Chem. Phys.*, 2018. V.18. P. 845–863.
14. Pierce J. R. Cosmic rays, aerosols, clouds, and climate: Recent findings from the CLOUD experiment // *Journal Geophys. Res. Atmos.* 2017. V.122. P. 8051–8055.
15. Svensmark H., Pedersen J.O., Marsh N.M. et al. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions // *Proc. Roy. Soc. A*. 2007. V. 463. P. 385–396.
16. Svensmark H., Enghoff M.B., Pedersen J.O. Response of cloud condensation nuclei (>50 nm) to changes in ion-nucleation // *Phys. Lett. A*. 2013. V. 377. P. 2343–2347.
17. Eichkorn S., Wilhelm S., Aufmhoff H. et al. Cosmic ray-induced aerosol-formation: First observational evidence from aircraft-based ion mass spectrometer measurements in the upper troposphere // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, № 14. P. 698.
18. Brattich E., Serrano Castillo E., Giulietti F. et al. Measurements of aerosols and charged particles on the BEXUS18 stratospheric balloon // *Ann. Geophys.* 2019. V. 37. P. 389–403.
19. Hoyt D.V., Schatten K.H. A discussion on plausible solar irradiance variations, 1700-1992 // *Journal of Geophys. Res.* 1993. V. 98, № A11, P. 18895–18906.
20. Mordvinov A.V., Makarenko N.G., Ogurtsov M.G., Jungner H.: Reconstruction of magnetic activity of the Sun and changes in its irradiance on a millennium timescale using neurocomputing // *Solar Physics*. 2004. V. 224. P. 247–253.
21. Beer J., Mende W., Stellmacher R. The role of the Sun in climate forcing // *Quat. Sci. Rev.* 2000. V. 19. P. 403–415.

Покровский О.М., Покровский И.О.**Трансляция медленных флуктуаций солнечной активности
в колебания компонентов глобальной климатической системы**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Российский государственный гидрометеорологический университет
Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79
E-mail: pokrov_06@mail.ru

Показано, что, учитывая нестационарный характер климатических рядов, наиболее подходящим методом их анализа является расчет вейвлет спектров. Обнаружено, что максимумы 11-летних солнечных циклов подчиняются долговременным модуляциям с широким спектром квази-периодичностей, в котором выделяются интервалы 60–80 летних, а также квази-вековых и квази-двухвековых колебаний. Указанные колебания транслируются в соответствующие осцилляции глобальной температуры поверхности океана (ТПО), приземного воздуха (ТПВ) и потоков уходящего длинноволнового излучения (УДР). Выявлены и исследованы медленные климатические колебания температуры вод поверхностного океанического слоя и для глубин океана до 700 м в северном полушарии как отклик на соответствующие модуляции солнечной активности. Долговременные модуляции с квази-периодом 60–80 лет, которые мы называем, следуя предшествующим исследователям, фундаментальным климатическим колебанием (ФКК), переходят далее внутри климатической системы в выявленные колебания площади ледового и снежного покрытия в северном полушарии, полученных исключительно по данным дистанционного зондирования, сохраняя квазипериодичности, заданные флуктуациями солнечной активности. Показано, что в свою очередь ФКК повторяется в рядах спутниковых данных альтиметрических измерений уровня мирового океана.

Ключевые слова: климатические колебания, вейвлет анализ, солнечная активность, температура приземного воздуха, температура поверхности океана, температура глубинных вод океана, площадь ледового и снежного покрова, уровень океана, альтиметрия.

Oleg M. Pokrovsky, Igor O. Pokrovsky**Coherence of Fluctuations of Components of The Global Climate System
with Slow Fluctuations of Solar Activity According to Conventional and
Satellite Observations**

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya street, Saint Petersburg, 192007, Russia
E-mail: pokrov_06@mail.ru

It is shown that, given the non-stationary nature of climate series, the most suitable method of analysis is the calculation of wavelet spectra. It was found that the maxima of 11-year solar cycles are subject to long-term modulations with a wide range of quasi-periods, in which the intervals of 60–80 years, as well as quasi-century and quasi-two-century fluctuations are distinguished. These fluctuations are also translated into corresponding oscillations of the global surface air temperature (SAT) and outgoing long-wave radiation (OLR) fluxes. Slow climatic fluctuations of water temperature in the surface ocean layer and for the ocean depths up to 700 m in the Northern Hemisphere as a response to the corresponding modulations of solar activity were identified and studied. Long-term modulations with a quasi-period of 60–80 years, which we call, following previous researchers, the fundamental climate oscillation (FCC), pass further within the climate system into the detected fluctuations in the area of ice and snow cover in the Northern Hemisphere, obtained exclusively from remote sensing data, while maintaining the quasi-periods set by fluctuations in solar activity. It is shown that, in turn, the FCC is repeated in the series of satellite data of altimetric measurements of the world ocean level. Moreover, the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere is also affected by modulations of solar activity, which is probably due to forced fluctuations in the temperature of the waters of the ocean, which is the main container of carbon and CO₂. Thus, if we talk about natural climate fluctuations of half-century, century and two-century

scales, we can talk about the coherence of such fluctuations, on the one hand, and solar activity oscillations, as an external disturbing factor, on the other hand.

Keywords: climate fluctuations, wavelet analysis, solar activity, surface air temperature, ocean surface temperature, ocean deep water temperature, ice and snow cover area, ocean level, altimetry.

Введение

Проблема изменения глобального климата привлекает постоянное внимание из-за влияния этого фактора на все стороны социально-экономического развития, а также на экологическое состояние окружающей среды. Научные исследования метеорологов и климатологов указывают на две основных составляющие процесса изменения климата: влияние парниковых газов на потепление и естественные медленные долгопериодные колебания. Потепление вследствие парникового эффекта ведет, согласно выводам МГЭИК [1], к монотонному росту глобальной температуры и, следовательно, к глобальной катастрофе в обозримом будущем. Ограничения выбросов парниковых газов не сможет изменить эту тенденцию [1]. С другой стороны, если окажется, что в действительности доминируют именно естественные медленные колебания климата, то более оптимистичный сценарий для будущего человечества станет реальностью.

В предыдущих работах [2, 3] было показано, что существует, по крайней мере, одно фундаментальное климатическое колебание (ФКК) с квазипериодичностью порядка 60–80 лет, генерированное соответствующими модуляциями солнечной активности. Наряду с ним также выделяются два других: вековое и двухвековое колебания. Эти колебания обсуждались и ранее во многих работах на эмпирическом уровне [4–7], но впервые удалось их выделить строгим математическим методом благодаря применению вейвлет анализа климатических рядов. Было показано, что медленные колебания солнечной активности трансформируются в соответствующие осцилляции температуры поверхности океана (ТПО) сначала в тропической зоне Мирового океана, а затем распространяются и во внетропические широты Тихого и Атлантического океанов в северном полушарии.

Возникает естественный вопрос – передается ли данный «климатический сигнал» в другие компоненты климатической системы, например, в атмосферу, в глубины океана и в криосферу? Настоящая работа посвящена ответу на эти и некоторые смежные вопросы.

Использованные данные и методика анализа

Несколько мировых центров подготавливают ряды температур приземного воздуха (ТПВ) (surface air temperature (SAT) – в английском оригинале) и других климатических параметров. Наиболее широко используются американские и британские массивы данных. Уточненные ряды глобальной температуры воздуха CRUTEM-3, 4 даны на сайте британского климатического центра MetOffice университета восточной Англии и описаны в работе [8]. Одновременно использовались комбинированные данные SAT и SST (температура поверхности океана) HADCRUTEM-4 [9]. Для изучения средней температуры слоев океана от поверхности до глубин 700 и 2000 м использовался климатический архив температур и теплоемкостей, представленный на сайте NODC (National Oceanographic Data Center) США, в разделе океанология. Массив данных по уходящей длинноволновой радиации (УДР) описан в работе [10]. Климатические ряды месячных и среднегодовых значений площади снежного и ледового покрова в северном полушарии были заимствованы из данных NOAA США. Архивы альтиметрических спутниковых измерений уровня океана, начиная с 1993 г., представлены на сайте океанической лаборатории университета Колорадо (США).

Именно вейвлет анализ позволяет оперировать с нестационарными рядами в отличие от классического Фурье анализа. Вейвлет анализ в науках о Земле предназначен для спектрального анализа как локальных (по временной координате), так и глобальных вариаций амплитуд климатических рядов [11]. После преобразования временных рядов в частотно-временную область данный метод позволяет выявить максимальные значения спектральных амплитуд, локализованные по временной оси, по годам, для определенных важнейших квази-периодичностей (квази-частот) климатических рядов. Формулы преобразования одномерного ряда в двумерный частотно-временной образ и соответствующий вычислительный алгоритм даны в работе [11], а для климатических приложений, также в [12]. Два свойства вейвлетов определяют их преимущества по отношению к другим спектральным методам, например, Фурье анализу. Первое – любой вертикальный разрез двумерного вейвлет спектра пропорционален одномерному преобразованию Фурье для данного момента времени. Таким образом, вейвлет выявляет нестационарность климатических рядов в количественной форме. Второе – интервал

детектируемых периодичностей получаемого спектра может в 4 раза превышать длину используемого временного ряда [13].

Анализ результатов

Вейвлет анализ является инструментом для выявления скрытых периодичностей. На рис.1 можно отметить 2 аномальные зоны периодичностей.

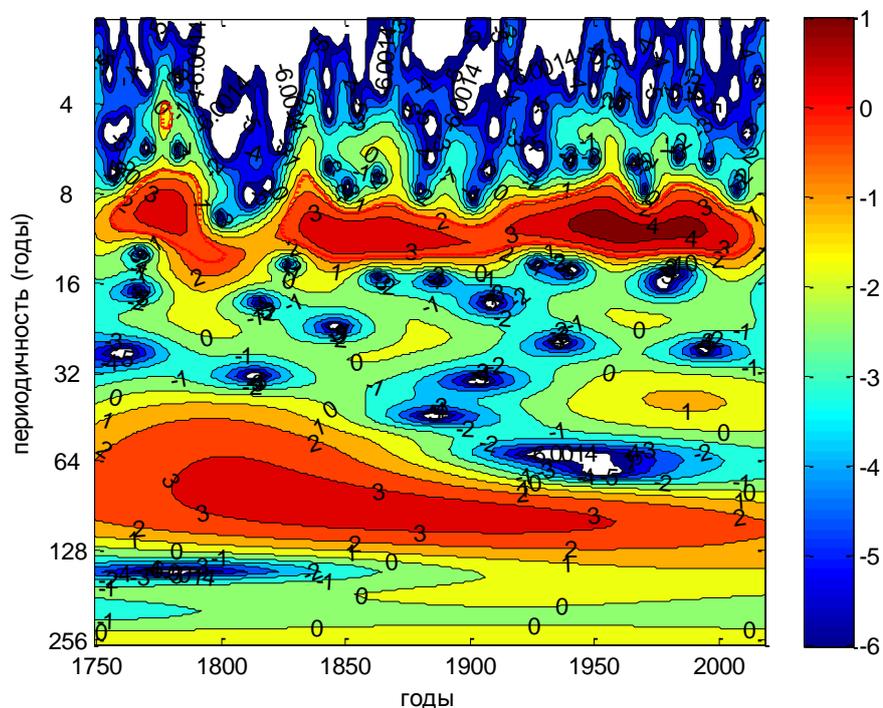


Рис. 1. Вейвлет спектр климатического ряда аномалий значений солнечной активности (числа Вольфа):

Первая, наиболее интенсивная зона, отвечающая 11-летнему циклу, прерывается только в интервале минимума Далтона. Вторая зона соответствует квази 60–80 летнему циклу естественных колебаний климата, о котором уже упоминалось ранее во многих работах, например, [6, 7, 14], продолжается с минимума в конце 19-го и начале 20-го веков, когда снижалась солнечная активность. Это известный вековой цикл солнечной активности («цикл Гляйсберга») имеет длину около 70–100 лет [14] и проявляется в модуляциях 11-летних циклов. Наряду с ним следует упомянуть и двухвековой цикл («цикл Зюсса» или «цикл де Врие»), [14], в качестве минимумов которого можно рассматривать феномен, происходящий, примерно, раз в 200 лет, который незначительно представлен в вейвлет спектре.

Предположительно величина ТПО в тропической зоне должна быть наиболее чувствительна к изменениям солнечной активности. Климатический ряд таких данных, основанный на инструментальных наблюдениях в тропической зоне океана (30°с.ш.- 30° ю.ш.) за последние полтора века, дает вейвлет спектр, сходный с рис. 1. Здесь можно найти 3 зоны скрытых квазипериодичностей. Самая интенсивная зона 60–70 лет непосредственно перешла из солнечного спектра (рис. 1). Но две других зоны, отвечающих очень медленным колебаниям около 128 и 256 лет, вероятно, представляют собой реакцию океана, как осциллятора, на упомянутые выше внешние возмущения (вековые солнечные циклы).

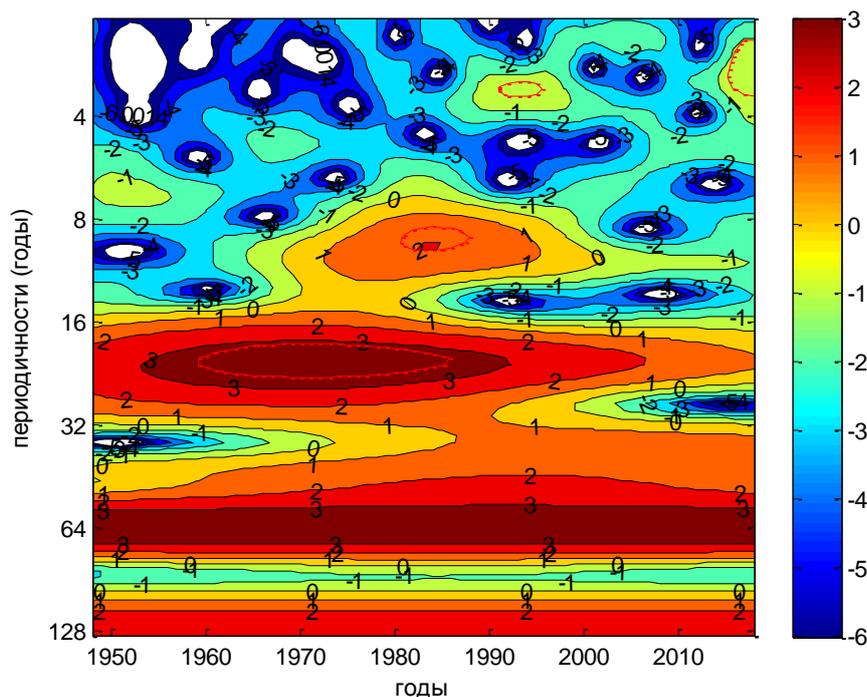


Рис. 2. Вейвлет спектр для климатического ряда УДР в интервале 1948–2018 гг.

Одним из первых, измеряемых со спутника, климатическим параметром был поток уходящего длинноволнового излучения, регистрируемого в «окне прозрачности» атмосферы 8–12 мкм. К настоящему времени данные многочисленных спутников систематизированы, проконтролированы (для исключения грубых погрешностей) и проинтерполированы по временной и пространственным координатам [10]. Это позволило получить соответствующие региональные и глобальные климатические ряды. Из физических соображений [5] следует, что величина потока уходящего длинноволнового излучения (УДР) определяется радиационной температурой подстилающей поверхности (океан, суша). Поэтому неудивительно, что конфигурация климатического ряда и соответствующего вейвлет спектра (рис. 2) повторяет основные черты вейвлет спектров для архива HAD CRUTEM объединения ТПО и температуры воздуха над сушей. Роль облачности в радиационном балансе Земли известна (К). В этой связи стоит напомнить еще один факт. В недавней работе [15] показано, что динамика глобального количества облаков и значений облачного покрытия над Мировым океаном также демонстрируют наличие отмеченных выше квази-периодических колебаний.

Аналогичные исследования проведены для климатических рядов следующих величин и привели к сходным результатам:

- Температура вод в глубинных слоях океана до 700 м
- Снежный покров и морской лед
- Изменения уровня Мирового океана и концентрации углекислого газа

Выводы

Все представленные результаты расчетов вейвлет спектров проверялись с помощью параллельных вычислений по обоим алгоритмам [11, 16] и привели к идентичным выводам для всех рассмотренных климатических параметров и временных интервалов. Содержательные выводы, отмеченные выше, подводят нас к заключению, что скрытые квазипериодические колебания (после исключения линейного тренда) солнечной активности транслируются в соответствующие колебания основных компонентов климатической системы (океан, атмосфера, криосфера), а затем проявляются в изменениях производных параметров (уровень океана, глобальная облачность, потоки длинноволновой радиации, площадь снежного покрытия и арктического льда). Исключение линейного тренда позволяет удалить влияние перехода от одной климатической эпохи (с масштабом многих тысячелетий) к другой. Только применение

современного аппарата спектрального анализа нестационарных климатических рядов позволило выявить их скрытые квазипериодичности, и их согласованность с колебаниями солнечной активности.

Таким образом, если говорить о естественных колебаниях климата полувекового, векового и двухвекового масштабов, можно говорить о когерентности таких колебаний, с одной стороны, и осцилляций солнечной активности, как внешнего возмущающего фактора, с другой стороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. IPCC. Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,
2. Stocker, et al, Eds., //Cambridge: 2013, Cambridge University Press., 896 p.
3. Покровский О.М., Покровский И.О. Исследование модуляций медленных колебаний солнечной активности с помощью вейвлет анализа.// Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право, 2019, N: 3 (35), с. 123–125.
4. Покровский О.М., Покровский И.О. Идентификация фундаментального климатического колебания с помощью вейвлет анализа комбинированных данных наземных и спутниковых наблюдений. // Исследования Земли из космоса, 2020, N 5, с. 3–13.
5. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука. 1973, 275.С.
6. Кондратьев К.Я. Актинометрия. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 690 с.
7. Наговицын Ю.А. Нелинейная математическая модель солнечной цикличности и возможности для реконструкции активности в прошлом. // Письма в Астрон. Журнал. 1997 т. 23, № 11–12, С . 859-862.
8. Хромов С.П. О некоторых спорных вопросах, относящихся к цикличности солнечной активности и ее предполагаемым связям с климатом. // Метеорология и Гидрология, 1973, №9, С. 93–98.
9. Jones, P.D., Lister, D.H., Osborn, T.J., Harpham, C., Salmon, M. and Morice, C.P. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. //Journal of Geophysical Research, 2012, v. 117, D05127.
10. Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A. and Jones, P.D. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset. // Journal of Geophysical Research, 2012, v. 117, D08101.
11. Liebmann B. and C.A. Smith, 1996: Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. // Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, v.77, p. 1275–1277.
12. Torrence C. and G. Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis. // Bulletin of the American Meteorological Society, v. 79, p. 61–78, 1998.
13. Покровский О.М. Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исследования Земли из космоса, 2010, N 5, с. 11–24.
14. Daubechies, I. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. // IEEE Trans. Inform. Theory, 1990, v. 36, p. 961–1004.
15. Gleissberg, W. Revision of the probability laws of sunspot variations. – Frankfurt (M.) : Astronom. Inst., 1973, 246 p.
16. Покровский О.М. Изменение облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта. // Исследования Земли из космоса, 2019, N 1, с. 3–13.
17. Grinsted A., J. C. Moore¹, and S. Jevrejeva. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. // Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, v. 11 p. 561–566.

Солдатенко С.А.^{1*}, Ле Маршалл Д.²

О влиянии спутниковой информации на точность прогнозов погоды и климата

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,
14 линия д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия
*E-mail: soldatenko@iias.spb.su

²Австралийское бюро метеорологии
Австралия, Виктория, 3008, Мельбурн, Коллинз ул., 700

В статье выполнена оценка влияния спутниковой информации, получаемой с помощью различных бортовых информационно-измерительных систем, на качество численных прогнозов погоды. Задача решена с помощью специальной технологии оценивания чувствительности прогноза к данным наблюдений, основанной на теории возмущений, сопряженных операторов и чувствительности. Для оценки вклада каждого источника информации в уменьшение ошибки прогноза используется полная энергетическая норма, соответствующая системе уравнений прогностической модели.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, спутниковая информация, сопряженные уравнения, чувствительность, энергетическая норма.

Sergei A. Soldatenko^{1*}, John Le Marshall²

On the Effect of Satellite Information on The Accuracy of Weather and Climate Forecasts

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, 199178, St. Petersburg, Russia
*E-mail: soldatenko@iias.spb.su

²Australian Bureau of Meteorology
700 Collins Str., Melbourne, VIC, 3008, Australia

This paper aims at assessing the impact of satellite information obtained from various on-board information-measuring systems on the quality of numerical weather forecasts. The problem was solved using a special technology for estimating the forecast sensitivity to observational data, based on perturbation theory, adjoint operators, and sensitivity. To assess the contribution of each source of satellite information to the reduction of forecast error, the total energy norm corresponding to the system of equations of the prediction model was used.

Keywords: numerical weather prediction, satellite information, adjoint equations, sensitivity, energy norm.

Введение

В течение последних нескольких десятилетий происходил достаточно устойчивый, хотя и не совсем монотонный, рост качества численных прогнозов погоды (ЧПП), что в значительной степени было обусловлено как существенным увеличением производительности вычислительной техники и совершенствованием атмосферных математических моделей, так и внедрением новых технических средств наблюдений и методов обработки колоссальных объемов информации [1, 2]. ЧПП является характерной задачей Коши, сводящейся к численному интегрированию системы многомерных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих термодинамические процессы во влажной атмосфере. Нахождение решения задачи Коши (в нашем случае будущего состояния атмосферы) предполагает задание начальных условий, определяющих последующую эволюцию атмосферы как динамической системы, которой свойственно явление детерминированного хаоса [3]. Основная причина хаотичности кроется в чрезвычайно высокой чувствительности атмосферной динамики к начальным условиям: бесконечно малая вариация начальных условий со временем приводит к сколь

удовно большим изменениям фазовой траектории динамической системы (атмосферы). Следовательно успешность прогнозов, получаемых с помощью разномасштабных атмосферных математических моделей, существенно зависит от точности оценки начального состояния атмосферы, которое, в свою очередь, определяется качеством и объемом первичной метеорологической информации, а также характеристиками системы усвоения (ассимиляции) данных наблюдений, в рамках которой собственно и происходит формирование начальных условий для ЧПП.

С целью сбора и обмена данными, необходимыми для прогнозирования погоды и выполнения климатических исследований была создана интегрированная глобальная система наблюдений (ИГСН) Всемирной метеорологической организации (ВМО), объединяющая Глобальную систему наблюдений Всемирной службы погоды ВМО, Глобальную систему наблюдений за климатом и Глобальную систему наблюдений за океаном. Распространение информации на всей территории земного шара происходит посредством Информационной системы ВМО. ИГСН – непрерывно модернизируемая многокомпонентная система. В последние примерно полтора-два десятилетия наиболее динамично развивающимся ее сегментом является космическая подсистема сбора информации об окружающей среде (ОС), включая атмосферу. Спутники "пришли" в метеорологию в начале 1960-х годов. Именно благодаря спутниковым наблюдениям за последние годы удалось существенно повысить точность прогнозов погоды. Неоценимый вклад в становление спутниковой метеорологии и изучение ОС с помощью бортовой аппаратуры дистанционного зондирования внес К.Я. Кондратьев. Начиная с 1963 года, им было опубликовано более двух десятков монографий в области дистанционных методов измерений и глобальной системы спутникового мониторинга ОС (см., например, [4–7]). Спутниковый сегмент ИГСН постоянно развивается и совершенствуется: регулярно обновляется орбитальная космическая группировка, повышается точность бортовой измерительной аппаратуры и расширяется ее номенклатура, улучшается наземная инфраструктура приема и обработки спутниковых данных. Сегодня установленный ВМО перечень информации, получаемой с помощью бортовой измерительной аппаратуры, включает в себя более сотни наименований. В этой связи логично задаться вопросом – в какой степени различная спутниковая информация, объем которой постоянно растет, а точность измерения повышается, влияет на успешность ЧПП? Ответ на этот вопрос может быть получен, на первый взгляд, довольно просто. Достаточно сравнить результаты двух прогнозов: контрольного, в котором метеорологическая информация, включая спутниковую, учитывается в полном объеме, и прогноза, полученного при условии, что информация, полученная с помощью конкретного измерительного устройства, исключается из рассмотрения в процессе ассимиляции данных. Этот подход носит название “Data Denial Experiment” (DDE) [8]. Учитывая, что спутниковая приборная база насчитывает несколько десятков различных измерительных систем, оценивать влияние той или иной информации на ЧПП с помощью метода DDE – вероятно, не лучший вариант. Существует иной, более универсальный, подход, называемый Forecast Sensitivity Observation Impact Experiment (FSOI), позволяющий оценить влияние различных видов информации на качество ЧПП в рамках одного вычислительного эксперимента [9]. В статье рассматриваются основные особенности и возможности метода FSOI и приводятся некоторые результаты оценивания влияния спутниковой информации, полученной с помощью различной бортовой измерительной аппаратуры, на точность ЧПП. Мерой ошибки прогноза служит полная энергетическая норма, соответствующая системе уравнений прогностической модели. Важно подчеркнуть, что метод FSOI позволяет не только оценить достоинства и недостатки существующей наблюдательной (спутниковой) системы, но и обосновать перспективы ее развития, обеспечив наилучшее соотношение цены и качества.

Материалы и методы

Глобальная спутниковая система наблюдений за состоянием ОС включает в себя геостационарные и полярно-орбитальные космические аппараты (КА) России, США, стран Европейского союза, Китая, Японии, Индии и Кореи. Координирует функционирование этой системы ВМО. Устройства активного и пассивного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности, устанавливаемые на КА, являются источниками огромного количества разнообразной информации о состоянии ОС, которая в рамках систем ассимиляции данных трансформируется в стандартный набор метеорологических параметров, используемых в ЧПП. Одной из наиболее эффективных и широко используемых в мировой практике систем усвоения метеорологической информации является четырехмерная вариационная ассимиляция данных наблюдений (4D-Var) [10, 11], сводящаяся к нахождению так называемого анализа $x^a \in R^n$ (начальных условий для ЧПП) посредством решения следующей оптимизационной задачи:

$$x^a = \arg \min J(x), \quad (1)$$

где целевой функционал $J(x)$ определяется следующим образом:

$$J(x) = \frac{1}{2} \|x - x^b\|_{B^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \|H(x) - y^o\|_{D^{-1}}^2. \quad (2)$$

Здесь $x^b \in R^n$ – оценка первого приближения состояния атмосферы (результат ЧПП за предыдущий срок); $y^o \in R^m$ – данные наблюдений; $\|\cdot\|_A$ – скалярное произведение, задаваемое матрицей метрики A ; B и D – ковариационные матрицы ошибок первого приближения и наблюдений, соответственно; H – оператор наблюдений (отображение $H: x \rightarrow y^o$). Поскольку оператор H – нелинейный, для нахождения глобального минимума функционала (2) задача 4D-Vар решается итерационно относительно инкремента $\delta x = x_j - x_{j-1}$, где j – номер итерации. В этом случае на каждой итерации нелинейный оператор H заменяется его линейным аналогом. Ассимиляция метеорологической информации происходит внутри так называемого окна усвоения – интервала времени $\Delta t_A = [t_{-h}, t_{+h}]$, где $h = 3 - 6$ часов, а начало прогноза t_0 приходится на середину окна усвоения.

Измерительные инструменты (зондировщики, скаттерометры, тепловизоры и др.), устанавливаемые на КА, характеризуются значительным разнообразием. Их полный перечень можно найти на сайте ВМО [12]. Количество данных наблюдений, полученных со спутников, имеет порядок 10^7 . Поступившая в метеорологический центр по каналам связи спутниковая информация проходит многоэтапную процедуру контроля качества. Затем результаты наблюдений, прошедшие процедуру контроля, подвергаются вычислительной обработке в рамках системы усвоения 4D-Vар, на выходе которой формируется вектор начальных условий (анализ x^a) для ЧПП. Важнейшей компонентой 4D-Vар является сопряженная модель, используемая при оценке влияния различной информации на точность ЧПП.

Рассмотрим вкратце процедуру этой оценки. Ошибка ЧПП определяется следующим образом:

$$e = \langle x^f - x_t^f, C(x^f - x_t^f) \rangle \quad (3)$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – скалярное произведение, x_t^f – оценка "точного" состояния атмосферы в момент верификации прогноза t^f (обычно за эту оценку принимается анализ в момент времени t^f), C – в диагональная весовая матрица, нормирующая энергию системы на единицу массы, выбираемая таким образом, чтобы ошибка ЧПП представляла собой полную энергетическую норму системы [9]:

$$e = \frac{1}{2M} \iiint \left(u'^2 + v'^2 + \frac{g^2}{\theta^2 N^2} \theta'^2 + \frac{1}{\rho^2 c^2} p'^2 + \frac{L^2}{c_p} q'^2 \right) \rho r^2 d\phi d\lambda dr. \quad (4)$$

Здесь использованы общепринятые в метеорологии обозначения. В момент t^f мы имеем две ошибки ЧПП: первая ошибка e^a соответствует прогнозу, вычисленному с начальными условиями x^a (т.е. с учетом наблюдений в начальный момент времени t_0), а вторая ошибка e^b соответствует прогнозу за предыдущий срок (т.е. данные наблюдений при $t = t_0$ не учитываются и состояние системы характеризуется вектором первого приближения x^b). Поэтому величина $\delta e = e^a - e^b$ показывает, насколько уменьшится ошибка ЧПП за счет данных наблюдений. Если $\delta e < 0$, то наблюдения обеспечивают уменьшение ошибки ЧПП.

Приведем окончательную формулу для расчета ошибки прогноза δe [9]:

$$\delta e = \langle d, \partial J_f / \partial y^o \rangle. \quad (5)$$

где $d = y^o - H(x^b)$ – так называемый вектор инноваций, $\partial J_f / \partial y^o$ – вектор-функция чувствительности, рассчитываемая с помощью сопряженной модели.

Результаты

Для оценки влияния спутниковой информации на точность ЧПП использовалась глобальная прогностическая модель британской метеорологической службы, модифицированная с учетом требований Австралийского бюро метеорологии [13]. Ранее данная модель применялась для оценки влияния наземных и аэрологических наблюдений на качество ЧПП [14]. В данном исследовании перечень бортовых систем, посредством которых была получена информация, включал в себя: инфракрасный интерферометр IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), инфракрасные зондировщики CrIS (Cross-track Infrared

Sounder) и AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), усовершенствованный микроволновый зондировщик AMSU-A/B (Advanced Microwave Sounding Unit), усовершенствованный микроволновый зондировщик ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder); сканер (в видимой области и инфракрасном диапазоне), установленный на геостационарном спутнике GOES (Geostationary Satellite Server) Национального управления океанических и атмосферных исследований США, скаттерометр ASCAT (Advanced Scatterometer), сканер (в видимой области и инфракрасном диапазоне), установленный на геостационарном спутнике MSG (Meteosat Second Generation) Европейского космического агентства; скаттерометр, установленный на полярно-орбитальном спутнике Европейского космического агентства (ESA); радиозатменные данные глобальной навигационной системы (GNSS-RO); сканеры, установленные на геостационарных спутниках японского метеорологического агентства (JMA); инфракрасный зондировщик высокого разрешения HIRS (High Resolution Infrared Sounder). Расчеты выполнены по материалам спутниковых измерений за 3-летний период (с 2016 по 2018 г.). На рис. 1 (левое окно) показано влияние различных спутниковых данных на уменьшение ошибки суточных прогнозов погоды δe (Дж/кг), осредненной по пространству (по всей территории земного шара) и по времени.

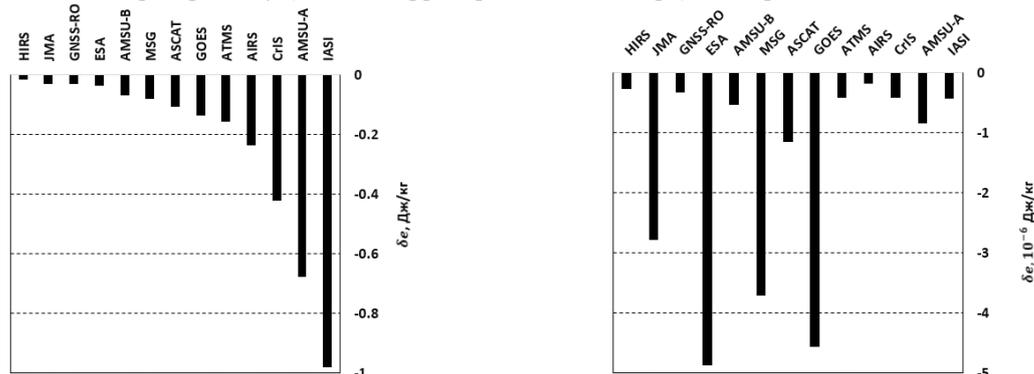


Рис. 1. Осредненное по времени и пространству влияние спутниковых данных (левое окно) и единичного измерения (правое окно) на уменьшение полной энергетической нормы суточного прогноза погоды

Наиболее существенный вклад в повышение точности ЧПП вносят данные, получаемые посредством IASI и AMSU-A. При этом наибольший вклад единичного измерения демонстрируют данные спутника ESA. Для сравнения отметим, что влияние синоптических и аэрологических измерений на суточный ЧПП в терминах δe составляют -0,30 и -0,75 Дж/кг соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benjamin S. et al. 100 Years of progress in forecasting and NWP applications. In: Meteorological Monograph. Amer. Met. Soc., Boston. 2019. V. 59. P. 13.1-13.67.
2. Hoffman R.N., Kumar V.K., Boukabara S.-A., Ide K., Yang F., Atlas R. Progress in forecast skill at three leading Global Operational NWP Centers during 2015–17 as seen in summary assessment metrics (SAMs) // Weather and Forecasting. 2018. V. 33. P. 1661–1679.
3. Lorenz E.N. Deterministic non-periodic flow // Journal of the Atmospheric Sciences. 1963. V. 20. P. 130–142.
4. Кондратьев К.Я. Метеорологические исследования с помощью ракет и спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1962, 252 с.
5. Кондратьев К.Я. Метеорологические спутники. Л.: Гидрометеиздат, 1963, 312 с.
6. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1970, 365 с.
7. Кондратьев К.Я. Спутниковая климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1983, 264 с.
8. Kelly G. et al. The value of observations. I: Data denial experiments for the Atlantic and the Pacific // Q.J. Roy. Met. Soc. 2007. V. 133. P. 1803–1815.
9. Langland R.H., Baker N.L. Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system // Tellus A. 2004. V. 56. P. 189–201.
10. Пененко В.В., Образцов Н.Н. Вариационный метод согласования полей метеорологических элементов // Метеорология и гидрология. 1976. № 11. С. 3–16.

11. Le Dimet F., Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects // *Tellus*. 1986. V. 38A. P. 97–110.
12. Observing Systems Capability Analysis and Review (OSCAR) Tool. URL: <https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments> (дата обращения 5.02.2020).
13. Puri K. et al. Implementation of the initial ACCESS numerical weather prediction system // *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*. 2013.V. 63. P. 265-284.
14. Soldatenko S.A. et al. Assessing the impact of surface and upper-air observations on the forecast skill of the ACCESS numerical weather prediction model over Australia // *Atmosphere*. 2018. V. 9. 23.

Шерстюков Б.Г.

Внешние факторы долгопериодных колебаний температуры поверхности Мирового океана

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»
Россия, 249035, г. Обнинск Калужской обл. ул. Королева 6
E-mail: boris@meteo.ru

Цель работы – оценить реальность воздействия барицентрического вращения Солнца на осевое вращение Земли и на температуру поверхности Мирового океана в разных его частях, а также оценить влияние геомагнитной активности на температуру океана. Показано, что увеличению момента инерции барицентрического вращения Солнца соответствует увеличение скорости вращения Земли вокруг ее оси с запаздыванием на 5 лет. Обнаружены высокие асинхронные корреляции между изменениями момента инерции и температуры поверхности океана. Самые высокие из них обнаружены в обширных океанических районах вдоль основных океанических течений с запаздыванием 35–37 лет. Аналогично, высокие асинхронные корреляции обнаружены между геомагнитной активностью и температурой поверхности океана вдоль основных океанических течений с запаздыванием изменений температуры на 3–4 десятилетия.

Ключевые слова: температура океана, Солнечная система, геомагнитная активность, корреляционный анализ.

Boris G. Sherstyukov

External factors of long-period fluctuations in the surface temperature of the ocean

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center
6 Koroleva St. Obninsk, Kaluga region, 249035, Russia
E-mail: boris@meteo.ru

The purpose of the work is to evaluate the reality of the effect of the barycentric rotation of the Sun on the axial rotation of the Earth and on the temperature of the surface of the World Ocean in its different parts, as well as to assess the effect of geomagnetic activity on ocean temperature. It is shown that for increase in the moment of inertia of the barycentric rotation of the Sun corresponds to an increase in the speed of rotation of the Earth around its axis with a delay of 5 years. High asynchronous correlations between changes in the moment of inertia and ocean surface temperature were found. The highest of them were found in vast oceanic areas along the main oceanic currents with a delay of 35–37 years. Similarly, high asynchronous correlations were found between geomagnetic activity and the temperature of the ocean surface along the main ocean currents with a delay of temperature changes of 3–4 decades.

Keywords: ocean temperature, solar system, geomagnetic activity, correlation analysis.

Введение

Достижения климатологии последних двух-трех десятилетий нередко сводят к достижениям физико-математического моделирования и к сценариям дальнейшего глобального потепления в результате усиления антропогенного парникового эффекта. Однако результаты анализа данных многолетних наблюдений за климатической системой показывают, что современное потепление климата в значительной мере можно объяснить долгопериодными природными колебаниями. Точное соотношение между вкладом природных и антропогенного факторов в изменения современного климата остается неопределенным, а вместе с ним неопределенной следует признать дальнейшую судьбу климата. От решения этой проблемы зависит дальнейшее технологическое устройство мира и мировая экономика.

Академик К.Я. Кондратьев в своих работах убедительно показывал необоснованность завышения роли парниковой антропогенной гипотезы в изменении климата [1, 2]. Признание климатической системы

открытой для внешних воздействий является наиболее перспективным для усовершенствования моделей климата и для получения адекватных оценок его изменения в будущем.

Материалы и методы

В работе использованы многолетние данные о среднегодовой температуре поверхности Мирового океана в узлах географической сетки (ТПО) с шагом 2° по долготе и широте за 1960–2018 гг., сведения о продолжительности суток (LOD) (обратная величина скорости осевого вращения Земли) за 1962–2018 гг., сведения о динамике планет Солнечной системы за 1700–2040 гг., данные планетарного индекса *aa* геомагнитной активности за 1901–2018 гг.. Ставилась задача получить оценки предполагаемых связей изменений ТПО с колебаниями внешних факторов с периодами от нескольких лет до нескольких десятилетий. Для этого временные ряды ТПО были сглажены методом скользящих средних по трем годам и из них исключены линейные тренды. Линейные тренды также были исключены из рядов индекса *aa* и LOD. Связи ТПО с внешними факторами оценивались методом асинхронного корреляционного анализа.

Результаты

Рассмотрено два предполагаемых внешних фактора воздействия на ТПО. Первый – динамические силы барицентрического вращения Солнца и планет-гигантов. Планеты вращаются не вокруг Солнца, а вокруг общего центра масс Солнца и планет (барицентра). Барицентр часто не совпадает с центром Солнца. В одни годы планеты оказываются на своих орбитах по разные стороны Солнца и тогда барицентр совпадает с центром Солнца, момент инерции барицентрического вращения становится равным нулю. В другие годы планеты собираются на одной стороне и тогда барицентр может выходить за пределы Солнца на расстояние до 2.19 радиусов от центра Солнца (парад планет). Момент инерции при этом максимальный.

По астрономическим данным об изменении долгот орбитального движения планет-гигантов (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) в барицентрической системе координат Солнечной системы вычислен многолетний ряд изменения момента инерции Солнца (*J*) при вращении Солнца вокруг барицентра. Момент инерции Солнца с каждой планетой вычисляется как произведение массы планеты на квадрат ее расстояния от Солнца. Суммирование по четырем планетам проводится с учетом их долгот. Суммарный момент инерции сильно зависит от конфигурации расположения планет, он характеризует неучтенное ранее динамическое воздействие на Землю, которое способствует появлению дополнительного осевого вращательного момента Земли и ее жидкой оболочки (океана). Временной ряд момента инерции демонстрирует циклические изменения внешнего воздействия на Землю с периодами 12–13, 37–39 и 179 лет (рис. 1).

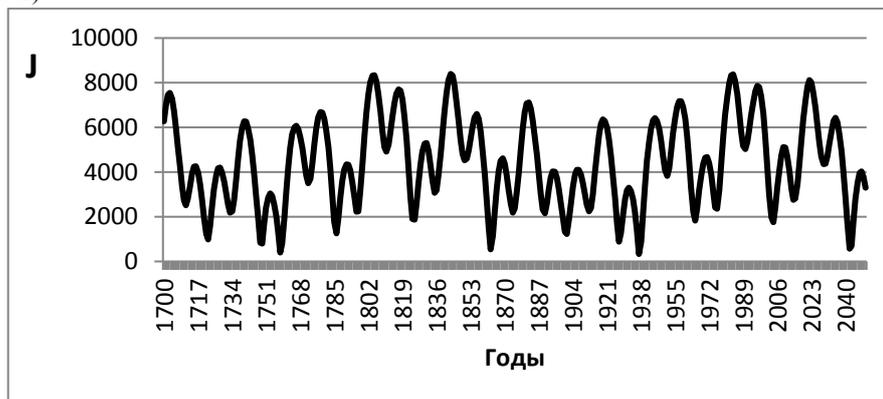


Рис. 1. Суммарный момент инерции вращения Солнца и планет-гигантов относительно центра масс Солнечной системы

Вычислены асинхронные коэффициенты корреляции между среднегодовыми значениями момента инерции *J* и продолжительностью суток (LOD) на Земле. LOD – величина обратно пропорциональная скорости вращения Земли. Наилучший коэффициент корреляции $R = -0.56$ оказался при запаздывании LOD на 5 лет (рис. 2). При изменении момента инерции возникают массовые силы, которые действуют на все оболочки Земли. График рис. 2 показывает, что усилению момента инерции соответствует усиление скорости осевого вращения Земли. Запаздывание на 5 лет изменений скорости, возможно, объясняется инерционными свойствами вязких слоев Земли.

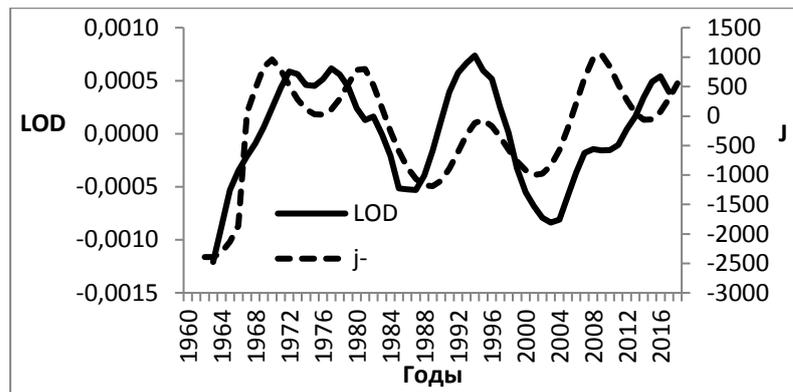


Рис. 2. Изменение момента баричесентрического вращения (с обратным знаком) и изменение продолжительности суток (сдвиг 5 лет)

Влияние изменений момента инерции J на Мировой океан оценивалось по асинхронным коэффициентам корреляции между J и ТПО во всех океанах Земли. Наилучшие положительные корреляции с $R=0.6-0.7$ обнаружались на холодных океанических течениях в Южном полушарии (циркумполярное Антарктическое, Перуанское, Южно-Пассатное течение) и в Северном полушарии (Калифорнийское, Северо-Пассатное) при запаздывании температурных изменений на 35–37 лет. Наилучшие отрицательные корреляции такой же величины по модулю, оказались на теплых океанических течениях (Восточно-Австралийское, Куроисио, Северо-Атлантическое) также при запаздывании температуры на 35–37 лет. Синхронные корреляции заметно слабее и возникают, видимо, из-за наличия в моменте инерции цикличности 37–39 лет. На рис.3 показан пример для сравнения многолетних изменений момента инерции J (со сдвигом на 36 лет) и ТПО. Сдвиг кривой J на графике устраняет запаздывание на 36 лет отклик изменений ТПО. Шкала горизонтальной оси соответствует нашему времени.

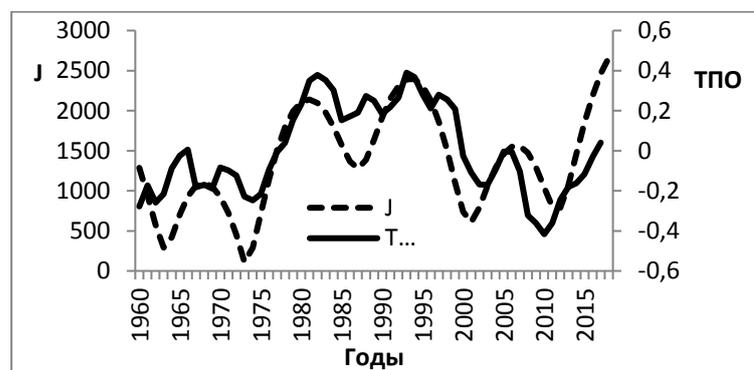


Рис. 3. Изменение момента инерции баричесентрического движения Солнца (пунктир) со сдвигом на 36 лет и изменение ТПО на Антарктическом течении в Тихом океане в узле 56°N; 268°E

Обобщение результатов по всем течениям и всем океанам приводит к выводу о появлении возмущений первоначально в глубинных течениях глобального океанического конвейера Брокера [3] под влиянием сил баричесентрического вращения, затем с многолетним запаздыванием возмущения выходят на поверхность. Время запаздывания соответствует известным представлениям о передаче возмущений в океане по вертикали. В разных частях Мирового океана на основных течениях вклад изменений момента инерции в изменения ТПО составляет от 25 до 50% общей изменчивости ТПО.

Второй анализируемый фактор – геомагнитные возмущения. Вычислены асинхронные корреляции индекса aa и температуры поверхности океана в узлах сетки. Наилучшие корреляции с многолетним запаздыванием изменений ТПО опять оказались в районах вдоль траекторий основных океанических течений. Положительные и отрицательные коэффициенты по модулю достигали $R=0.6-0.7$. В Северном полушарии преобладают отрицательные корреляции на теплых течениях: в Атлантическом океане – Гольфстрим, Северо-Атлантическое течение, Норвежское течение; в Тихом океане – Куроисио, Северо-Тихоокеанское течение, а в Южном полушарии значимые положительные корреляции обнаруживаются на холодных течениях, главным из которых является циркумполярное Антарктическое

течение, проходящее по южным районам Тихого, Атлантического и Индийского океанов. Вклад геомагнитной активности в изменения ТПО составил от 35 до 45% общей изменчивости. Запаздывание составило от 32–34 года в Северной Атлантике в районе пересечения Северо-Атлантическим течением Срединно-Атлантического хребта, до 35–36 лет в узком месте выхода Гольфстрима из Мексиканского залива и даже до 39–44 лет в Тихом океане в районе пересечения Северо-Тихоокеанским течением Северо-Западного подводного хребта и далее по течению с переходом на прилегающий район северной части Северо-Восточной котловины.

Высокие корреляции обнаружены в центральной экваториальной части Тихого океана в районе появления Эль-Ниньо и Ла-Ниньо (запаздывание около 43 лет), и в районе с известным Южным колебанием (запаздывание 42–44 лет).

Примечательно, что как в случае с моментом инерции, так и в случае с геомагнитной активностью самые высокие коэффициенты корреляции, по модулю превышающие 0.5–0.6 и до 0.7 обнаруживаются в тех местах океанов, в которых основные течения пересекают подводные хребты или проходят через гряды островов. Это еще раз подсказывает, что возмущения в океане происходят на больших глубинах океана и затем распространяются по вертикали с многолетним запаздыванием.

На рис. 4 показан график временного хода ТПО в районе Южного колебания (точка с координатами 4°сш и 104°вд) и график изменения *aa*, сдвинутый на 42 года вправо по горизонтальной оси. Это пример положительной связи. Коэффициент корреляции $R=0.66$. Аналогичная зависимость обнаружена в экваториальной части Тихого океана в районе обычного появления Эль-Ниньо и Ла-Ниньо.

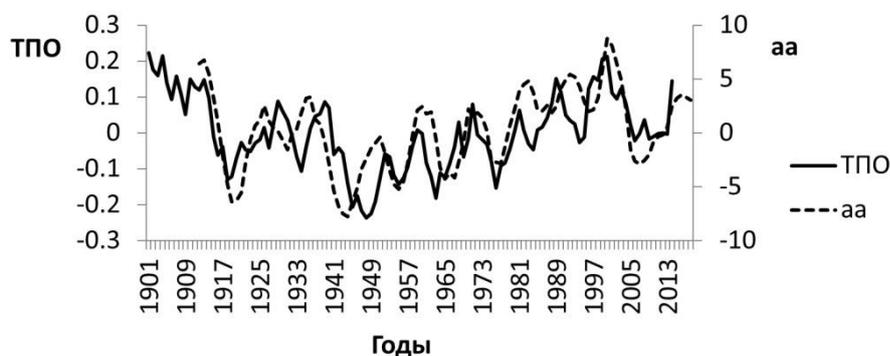


Рис. 4. Изменение ТПО в географическом узле с координатами 4°сш и 104°вд и изменение планетарного геомагнитного индекса *aa* со сдвигом на 42 года

А на рис. 5 показан график ТПО в Атлантике юго-западнее Африки (точка с координатами 28°юш и 10°вд) и график изменения *aa*, сдвинутый на 38 лет вправо на графике. Это пример отрицательной связи. Коэффициент корреляции $R=-0.70$. В моменты магнитных бурь изменяется магнитный поток магнитного поля Земли и возникает кольцевой индукционный ток предположительно во всех проводящих средах на Земле, преимущественно в зональном направлении. Уже известен такой эффект в магнитосфере и в ионосфере, следовательно аналогичные токи должны возникать и в океане.

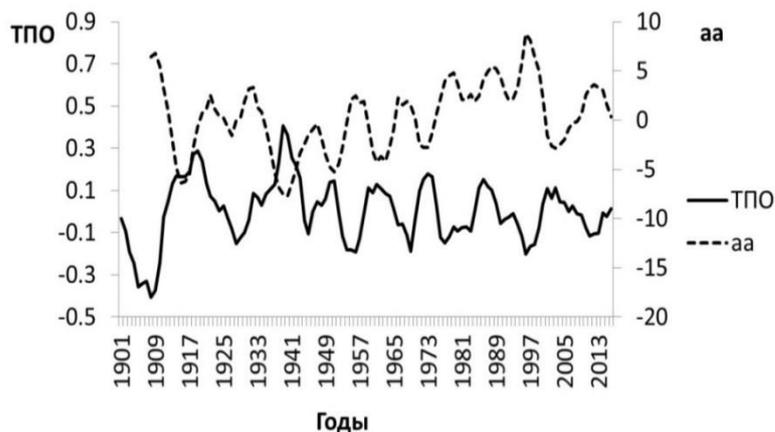


Рис. 5. Изменение ТПО в географическом узле с координатами 28°юш и 10°вд и изменение планетарного геомагнитного индекса *aa* со сдвигом на 38 лет

Пока не ясно достаточно ли энергии этих токов для появления возмущений в океанических течениях. Полученные результаты позволяют предположить, что достаточно. Необходимы дополнительные оценки.

Выводы:

1. Циклическое движение Солнца вокруг общего центра масс Солнечной системы сопровождается изменением момента инерции движения Солнца. Земля следует за Солнцем и подвержена воздействию на нее всех сил, возникающих при барицентрическом вращении Солнца. Увеличению момента инерции барицентрического вращения Солнца соответствует увеличение скорости вращения Земли вокруг ее оси с запаздыванием на 5 лет.
2. Циклическое барицентрическое вращение Солнца сопровождается изменениями температуры поверхности Мирового океана вдоль траекторий основных океанических течений. Изменения ТПО в разных частях Мирового океана следуют за изменениями момента инерции с запаздыванием 35–37 лет.
3. Наблюдаются тесные корреляции долгопериодных изменений температуры поверхности Мирового океана в районах основных океанических течений с изменениями планетарной геомагнитной активности. Изменения ТПО в разных частях Мирового океана следовали за изменениями индекса *aa* с запаздыванием на 3–4 десятилетия. Наилучшие связи обнаружались в местах пересечения океаническими течениями препятствий в виде подводных хребтов или гряд островов.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (проект 18-05-00721 и 18-45-160006).

ЛИТЕРАТУРА

1. Демирчян К.С., Кондратьев К.Я., Демирчян К.К. Глобальное потепление и «политика» его предотвращения // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера», т. 2, 2010, №4, с. 488–502.
2. Кондратьев К.Я. Изменения глобального климата: нерешенные проблемы // Метеорология и гидрология. 2004, №6. С.118–127.
3. Broecker, W.S. The great ocean conveyor // Oceanography, 1991, N4(2), pp.79–89.

Секция 3

«Геополитика, экодинамика и экологическая безопасность»

УДК 551.582/.583(98)

**Алексеев Г.В.* , Вязилова А.Е., Глок Н.И., Кулаков М.Ю.,
Харланенкова Н.Е.**

Роль низких широт в потеплении Арктики

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»
Россия, 199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, дом 38
*E-mail: alexgv@aari.ru

Показано, что в потепление Арктики зимой основной вклад вносят атмосферные и океанические притоки тепла и влаги из Атлантики, а их истоки находятся в низких широтах, где аккумулируется тепло солнечной радиации. Здесь с участием орбитально-обусловленных межгодовых изменений инсоляции формируются положительные тренды температуры поверхности океана, температуры воздуха и содержания водяного пара, которые, в конечном итоге, влияют на потепление в Арктике.

Ключевые слова: потепление Арктики, Атлантика, низкие широты, инсоляция, переносы тепла и влаги.

**Genrikh V. Alekseev* , Anastasia E. Vyazilova, Natalia I. Glok,
Mikhail Y. Kulakov, Natalia E. Kharlanenkova**

The role of low latitudes in the Arctic warming

Arctic and Antarctic Research Institute
38, Bering str., St. Petersburg, 199397, Russia
*E-mail: alexgv@aari.ru

It is shown that atmospheric and oceanic transports of heat and moisture from the Atlantic contribute significantly to the warming of the Arctic in winter. Their sources are located in low latitudes, where the heat of solar radiation accumulates. Positive trends in the ocean surface temperature, air temperature and water vapor content are formed here with the participation of orbital interannual changes in insolation. They, in turn, affect the warming in the Arctic 2–3 years later.

Keywords: Arctic warming, Atlantic, low latitudes, insolation, heat and moisture transport.

Введение

Меридиональные переносы атмосферного тепла и влаги в Арктику, рассчитанные по данным реанализа ERA Interim [1], показали, что основной приток явного и скрытого тепла в высокоширотную Арктику зимой происходит через атлантическую часть (от 0° до 80° в.д.) 70° с.ш. в слое от поверхности до 750 гПа. Вклад этого притока в межгодовую изменчивость средней зимней температуры воздуха на поверхности составляет более 50%, и возрастает. Недавно Као и др. [2] подтвердили, что увеличение парникового эффекта, вызванного водяным паром зимой, замедляет рост льда и ускоряет начало таяния.

Летом основной вклад в потепление вносят радиационные притоки тепла к поверхности снега и льда, в том числе длинноволновое излучение, которое увеличивается из-за увеличения содержания водяного пара в атмосфере при таянии снега и льда и появлении открытой воды. При этом перенос влаги через 70° с. ш. не влияет на содержание пара в нижней тропосфере, где преобладает отток из Арктики [1]. На потепление в Арктике и, особенно, на уменьшение площади морского льда также влияет приток теплой и соленой воды из Северной Атлантики в Баренцево и Гренландское моря [3, 4].

Наши исследования [5] показали, что основной источник притока тепла в Арктику расположен в низких широтах Северной Атлантики, где формируются аномалии температуры поверхности океана ТПО, влияние которых через 2–3 года проявляются в изменениях притока тепла в Арктику, температуре воды и протяженности морского льда в Северном Ледовитом океане. При этом межгодовые колебания зимнего атмосферного переноса тепла в Арктику задерживаются относительно аномалий ТПО в низких широтах от 23 до 30 месяцев, что может происходить только при участии океанической циркуляции.

Данное исследование направлено на более полное сопоставление изменений климата в низких широтах Северного полушария и в Арктике, включая морские льды и на выяснение роли инсоляции в формировании влияния низких широт на потепление климата Арктики.

Данные и методы

Для исследования использованы данные реанализа ERA5 за 1979–2018 гг., данные наблюдений на арктических гидрометеорологических станциях, данные о площади арктических морских льдов, представленные на сайтах ААНИИ и NSIDC (США) [6], данные о температуре поверхности океана (ТПО) с сайта Met Office Hadley Centre [7]. Значения инсоляции получены из расчетов приходящей на поверхность Земного шара без учета атмосферы солнечной радиации, выполненных А.А. Костиным и В.М. Федоровым для периода с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. [8]. Параметры морского ледяного покрова (толщина и объём) получены из расчётов по модели AARI-IOCM [9].

Методы исследования включали оценку ежемесячных, сезонных и годовых значений общего содержания водяного пара в атмосфере (TCWV), нисходящей длинноволновой радиации на поверхности (STRD), облачности, приповерхностной температуры воздуха (SAT), инсоляции в областях 70–90° и 0–25°с.ш. за 1979–2019 гг. По данным наблюдений на 18 метеостанциях вдоль побережья сибирских арктических морей рассчитаны суммы отрицательных температур воздуха (SGDM), являющихся интегральным показателем термического форсинга зимнего нарастания морского льда. На модели морского льда и океана, разработанной в ААНИИ [9], рассчитаны ежемесячные значения толщины (H) и объёма льда (Vol) за 1981–2017 гг., осредненные по акватории Арктического бассейна и арктических морей. Ряды перечисленных характеристик были сопоставлены исходя из физических оснований зависимости между ними с использованием методов корреляционного и спектрального анализа, представления результатов в виде графов.

Результаты

Сравнение изменений средних по области 70–87.5° с.ш. ежемесячных, сезонных и годовых значений TCWV, STRD, SAT, SGDM за 1979–2019 гг., ежемесячных значений толщины (H) и объёма льда (Vol) за 1981–2017 гг. показало тесные связи между ними (рис. 1). Высокие значения коэффициентов корреляции указывают на соответствие между изменениями параметров за рассматриваемый период. Изменения согласованы не только линейным трендом, но и периодами медленных до конца 1990-х гг. и ускоренных изменений позднее. Коэффициенты корреляции на рис. 1 представляют сокращенное описание связей между параметрами.

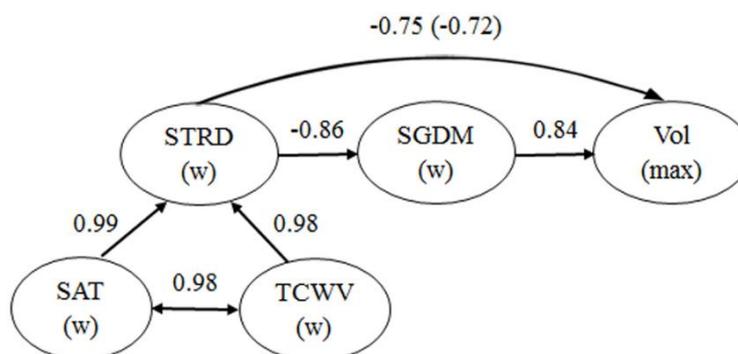


Рис. 1. Граф связей между характеристиками атмосферы и морским льдом в Арктике. Цифры над стрелками – коэффициенты корреляции. В скобках – коэффициент, отражающий транзитивность связей

Спектры изменений (рис. 2) содержат основную часть (50–70%) дисперсии на низких частотах (периоды более 16 лет). Спектральный анализ связи показывает также наиболее высокую когерентность на этих периодах. Высокочастотная часть спектра (периоды менее 3-х лет) вносит, как правило,

незначительный вклад (менее 10%) в изменчивость при незначимой когерентности и может быть удалена, например, сглаживанием рядов с окном 3 года.

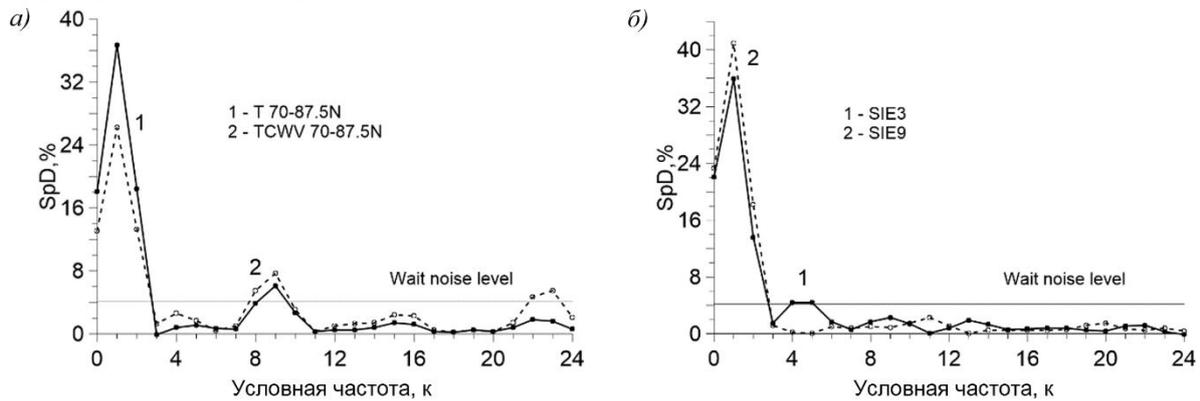


Рис. 2. Спектральные плотности межгодовой изменчивости зимних температуры воздуха и содержания водяного пара (а), площади, занятой морским льдом в марте и сентябре (б) в Арктике. Период T (годы), соответствующий условной частоте k , равен $T=48/k$

Установленное в работе [1] влияние переносов тепла и влаги из низких широт на климатические изменения температуры воздуха в Арктике распространено на рассмотренные выше параметры и отношения между ними, включая параметры морских льдов. На рис. 3 сопоставлены изменения приповерхностной температуры воздуха и содержания водяного пара в атмосфере в области $0-25^\circ$ с.ш. осенью с аналогичными параметрами в области $70-87.5^\circ$ с.ш. зимой и с суммой градус-дней мороза и площадью льда в марте. Ряды предварительно сглажены с окном 3 года, основываясь на результатах спектрального анализа, и учтено запаздывание (табл. 1) изменений параметров в Арктике относительно изменений в низких широтах.

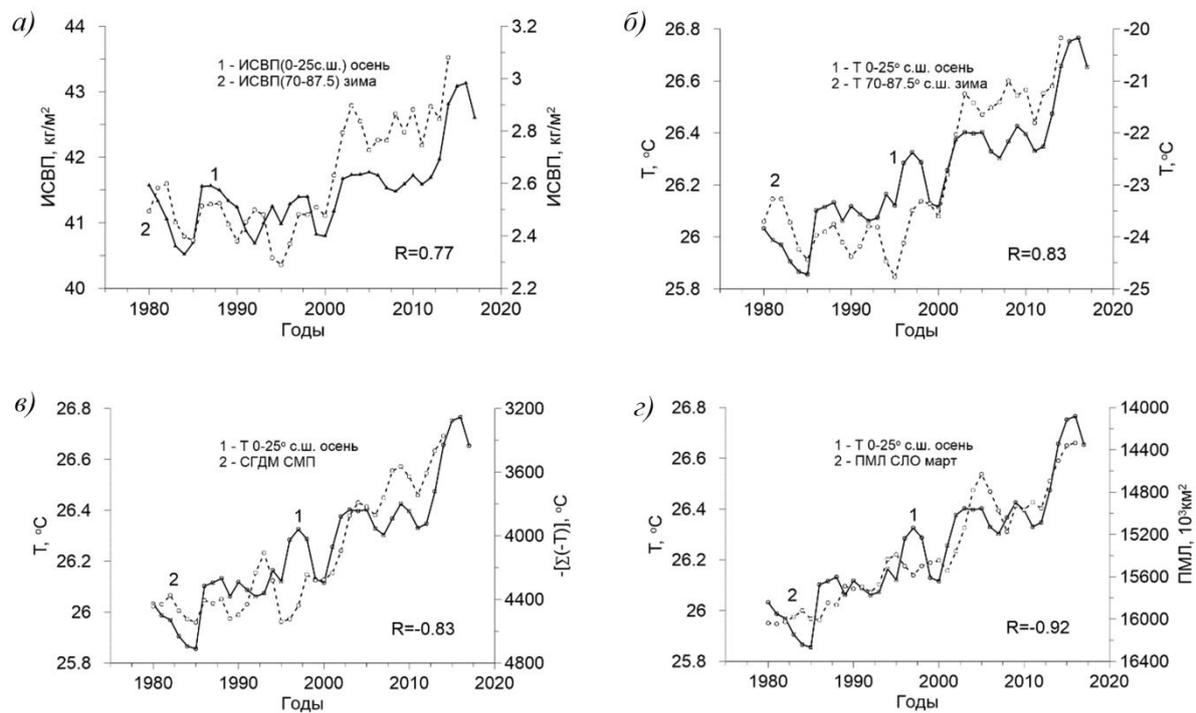


Рис. 3. Изменения содержания водяного пара в атмосфере (а) и приповерхностной температуры воздуха (б) в области $0-25^\circ$ с.ш. осенью и в области $70-87.5^\circ$ с.ш. зимой, а также изменения суммы градус-дней мороза (в) и площади льда (г) в марте. Ряды сглажены с окном 3 года и учтено запаздывание изменений в Арктике относительно низких широт

В табл. 1 представлены коэффициенты корреляции между приповерхностной температурой воздуха, интегральным содержанием водяного пара в атмосфере в области 0–25° с.ш. осенью (Т(0–25° с.ш.), ИСВП (0–25° с.ш.)) и характеристиками климата Арктики: приповерхностная температура воздуха Т (70–87.5° с.ш.), содержание водяного пара ИСВП (70–87.5° с.ш.) зимой, протяженность морского льда в СЛО в марте, средняя сумма «градус-дней мороза» на 18 станциях в арктических морях, объём, толщина ровного и средняя толщина льда, рассчитанные по модели. Все при различных запаздываниях (от 1 до 6 лет) характеристик климата Арктики. Сглаживание рядов не проводилось.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между изменениями характеристик климата в областях 0–25° с.ш. и 70–87.5° с.ш. при разных запаздываниях (1–6, годы) изменений в Арктике. Жирным шрифтом выделены максимальные значения коэффициентов корреляции

Характеристики климата Арктики	Т (0–25° с.ш.) осень						Период
	1	2	3	4	5	6	
Т (70–87.5° с.ш.) зима	0,509	0,633	0,721	0,568	0,573	0,522	1979–2018
ПМЛ СЛО март	-0,728	-0,813	-0,675	-0,608	-0,616	-0,515	1979–2018
СГДМ СМП	-0,581	-0,702	-0,704	-0,545	-0,634	-0,529	1979–2018
V _л модель апрель	-0,595	-0,69	-0,711	-0,679	-0,649	-0,643	1983–2017
H _{рл} модель май	-0,612	-0,654	-0,702	-0,734	-0,556	-0,51	1983–2017
H _{ср} модель май	-0,573	-0,678	-0,689	-0,644	-0,642	-0,64	1983–2017
	ИСВП (0–25° с.ш.) осень						
ИСВП (70–87.5° с.ш.) зима	0,422	0,493	0,607	0,325	0,34	0,242	1979–2018
Т (70–87.5° с.ш.) зима	0,439	0,539	0,624	0,365	0,364	0,325	1979–2018
ПМЛ СЛО март	-0,571	-0,643	-0,47	-0,373	-0,316	-0,194	1979–2018
СГДМ СМП	-0,492	-0,583	-0,573	-0,359	-0,374	-0,318	1979–2018
V _л модель апрель	-0,438	-0,542	-0,553	-0,464	-0,415	-0,443	1983–2017
H _{рл} модель май	-0,458	-0,504	-0,549	-0,582	-0,413	-0,329	1983–2017
H _{ср} модель май	-0,383	-0,475	-0,518	-0,415	-0,37	-0,38	1983–2017

Запаздывания приходятся в основном на 3-й год и составляют от 27 (для температуры воздуха) до 32 (для толщины льда) месяцев.

Обобщение связей между климатическими изменениями в Арктике и в низких широтах представлены в виде графа на рис. 4.

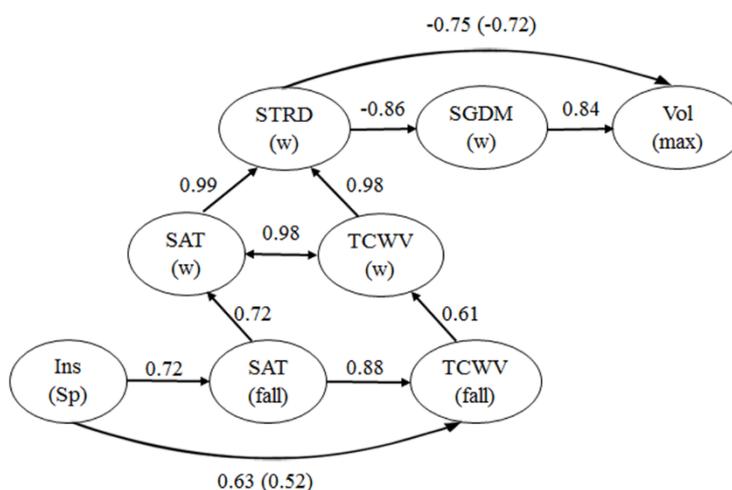


Рис. 4. Граф связей между климатическими процессами в Арктике в низких широтах и межширотных зависимостей. Два верхних ряда относятся к Арктике, нижний ряд – к области 0–25° с.ш. В скобках – коэффициент, отражающий транзитивность связей

В низких широтах находятся климатические области максимальной температуры воздуха, максимальной ТПО и максимального содержания водяного пара в атмосфере, которым соответствует область максимального притока солнечной радиации. Здесь накапливается основная часть избытка тепла, поглощаемого океаном [10, 11]. В формировании аномалий температуры поверхности океана (ТПО), интегрального содержания водяного пара и температуры воздуха в низких широтах участвуют межгодовые изменения инсоляции низких широт под влиянием астрономических колебаний и солнечной активности. Хотя изменения инсоляции малы, их эффект усиливается в результате накопления тепла в океане, составляющем большую часть площади низких широт, малым альбедо поверхности, а также обратными связями между температурой, содержанием водяного пара и нисходящей длинноволновой радиацией. Чтобы оценить вклад инсоляции, использованы расчеты приходящей на поверхность Земного шара без учета атмосферы солнечной радиации, выполненные А.А. Костиным и В.М. Федоровым (<http://www.solar-climate.com/>) для периода с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. Средние значения инсоляции и атмосферных параметров в низких широтах рассчитывались в области 0–25° с.ш. для каждого месяца, сезона и года. Оценки тренда показали наибольший рост инсоляции низких широт весной и слабый рост в среднем за год (табл. 2).

Таблица 2

Тренды средней инсоляции области 0-25°с.ш. ($Wm^{-2}уг^{-1}$)×100 за 1979–2018 гг. Жирным выделены положительные тренды

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль
Тренд	0.056	0.23	0.344	0.422	0.398	0.26	0.04
Месяц	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Весна	Год
Тренд	-0.19	-0.359	-0.388	-0.282	-0.109	0.352	0.025

Наибольшая корреляция в области 0–25° с.ш. найдена между инсоляцией весной и приповерхностной температурой воздуха, температурой поверхности воды и другими параметрами (содержание водяного пара, нисходящая длинноволновая радиация) осенью. Такую связь можно объяснить кумулятивным эффектом инсоляции океана, формирующим осенний максимум ТПО в низких широтах. Расчеты спектров и когерентности показали, что высокая корреляция между инсоляцией и температурой обеспечивается, прежде всего, периодами более 16 лет (вклад в дисперсию более 50%), а также заметен на периодах около 4 и 6 лет.

Изменения температуры в области 0–25° с.ш. осенью проявляются через 2–3 года в изменениях температуры зимой в области 70–87.5° с.ш. (через 27 месяцев для центральных месяцев сезонов). Вклад инсоляции низких широт в межгодовые изменения температуры воды и воздуха, оцененный в работе [12] из анализа составляющих притока тепла солнечной радиации на поверхность океана, составил 57% максимального тренда ТПО в октябре в тропической области Северной Атлантики.

Выводы

Основной вклад в зимнее потепление в Арктике принадлежит атмосферным и океаническим притокам тепла и влаги из Атлантики, что также влияет на уменьшение протяженности и толщины льда.

Источники атмосферного и океанического тепла для Арктики располагаются в низких широтах, где накапливается тепло солнечного излучения.

Максимальные тренды SAT, SST и TCWV формируются здесь осенью более чем на 50% под влиянием положительных трендов инсоляции в весенние и первые летние месяцы. В свою очередь, осенние тренды атмосферных параметров в тропиках влияют на климатические тренды в Арктике.

Исследования поддерживаются грантами РФФИ 18-05-00334 и 18-05-60107.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming // Int. J. Climatol. 2019. 1–11.
2. Cao Y., Liang S., Chen X., He T., Wang, D., Cheng, X. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting // Sci. Rep. 2017. 7. 8462.

3. Alekseev G.V., Glok N.I., Smirnov A.B., Vyazilova A.E. The influence of the North Atlantic on climate fluctuations in the Barents Sea and their predictability // *Russian Meteorology and hydrology*. 2016. 41. P. 544–558.
4. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике. *Лёд и Снег*. 2017;57(3):381-390.
5. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Том 1. С. 106–123.
6. National snow and data center (NSIDC). Электронный ресурс: <http://nsidc.org/>.
7. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, No. D14, 4407 10.1029/2002JD002670.
8. Солнечная радиация и климат Земли. Электронный ресурс: <http://www.solar-climate.com>.
9. Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Шутилин С.В. AARI–IOCM – совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. № 2 (92). С. 6–18.
10. Palmer M.D., Haines K., Tett S.F.B., Ansell T.J. Isolating the signal of ocean global warming // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. No. L23610. p. 1–6.
11. Cheng L., Abraham J., Hausfather Z., Trenberth K.E. How fast are the oceans warming? Observational records of ocean heat content show that ocean warming is accelerating // *Science*. 2019. 363. P. 128–129. Doi: 10.1126/science.aav7619.
12. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (in press).

Бажина Е.В., Парфенова Е.И., Чебакова Н.М.

Усыхание темнохвойных древостоев в горах Южной Сибири: локализация и возможные причины

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: genetics@ksc.krasn.ru

В последние несколько десятилетий в горах Южной Сибири наблюдается усыхание темнохвойных лесов. Наиболее интенсивно повреждаются деревья пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.). Причины данного феномена до сих пор достоверно не определены. В работе рассмотрены особенности распределения усыхающих кедрово-пихтовых насаждений в горных лесах Сибири, анализируются гипотезы причин повреждения.

Ключевые слова: *Abies sibirica* Ledeb., *Pinus sibirica* Du Tour., изменения климата, биотические повреждения, воздушные поллютанты.

Elena V. Bazhina, Elena I. Parfenova, Nadezhda M. Tchebakova

Dieback of dark-coniferous stands in South Siberia Mountains: locations and hypothesis

V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center
«Krasnoyarsk Science Center SB RAS»
Russia, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok 50/28
E-mail: genetics@ksc.krasn.ru

Diebacks of dark-coniferous stands forests in South Siberia Mountains have been observed during a few past decades. *Abies sibirica* Ledeb. trees were damaged most intensively. To date, the causes of this phenomenon have not been reliably identified. The paper considers the distribution features of cedar-fir stands diebacks in mountain forests across the South Siberia Mts. and analyzes some hypotheses of the damage causes.

Keywords: *Abies sibirica* Ledeb., *Pinus sibirica* Du Tour., climate changes, biotic damages, air pollutions.

Введение

В настоящее время в горах Южной Сибири (хребты Хамар-Дабан в Прибайкалье, Кулумыс, Ойский – в Западном Саяне, Кайдынский и его отроги – в Восточном Саяне, хребты нагорья Кузнецкий Алатау, отроги Чулышманского хр. – в северо-восточном Алтае) наблюдается усыхание темнохвойных (кедрово-пихтовых) лесов [1–3]. Массовые повреждения кедрово-пихтовых лесов в горах Западного Саяна и на хребте Хамар-Дабан визуально отмечаются с середины 70-х XX столетия, отдельные деревья повреждались уже в начале 1960-х гг. Несколько позже обратили внимание на усыхание пихты в отрогах Восточного Саяна (начало 1990-х гг.) и на северо-восточном Алтае (начало 2000-х гг.) [4–5]. Усыхание охватывает различные типы леса, высотные границы зон повреждения несколько варьируют в различных частях гор, однако, практически везде повреждаются преимущественно деревья пихты сибирской в возрасте 90 (северо-восточный Алтай – 60) лет и старше (табл. 1). Деревья кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour), как и встречающиеся в некоторых фитоценозах деревья лиственницы и сосны практически не имеют признаков повреждения, за исключением нагорья Кузнецкий Алатау (окрестности г. Белогорск, действующий нефелиновый рудник), где у деревьев кедра осталось лишь несколько живых ветвей в верхней части кроны, у деревьев пихты усохла большая часть кроны [3]. Дистанционные исследования (Landsat, MODIS) показали, что кедр в Кузнецком Алатау усыхает на высотах 650–900 м над ур. м., предполагается, что триггерную роль, как и в горах Хамар-Дабана, играют засухи [6–7].

В течение нескольких десятилетий деструкция горных лесов происходила достаточно медленно, пока в середине 2000-х гг. не приняла катастрофический характер вследствие инвазии дальневосточного полиграфа – *Polygraphus proximus* Blandford, площадь распространения которого в Сибири оценивают – 750х750км [8]. В настоящее время короедом повреждены древостои низко- и среднегорных высотных

поясов Западного и Восточного Саян, Присалаирья (Новосибирская область), Горной Шории (значительная часть Кемеровской области), горных районах Алтая, Республик Алтай и Хакасия, а также подзон южной тайги и подтайги Западно-Сибирской равнины (Томская область). Короед нападает, как правило, на ослабленные деревья пихты, но при высокой плотности может заселять и здоровые.

В настоящем исследовании представлены результаты анализа локализации и возможных причин повреждения пихты сибирской в темнохвойных лесных экосистемах гор Южной Сибири.

Материалы и методы

Оценка жизненного состояния древостоев [9] проводилась в течение ряда лет (1991–2019 гг.), особенности и датировка повреждений устанавливались на основе анализа модельных деревьев [10]. Также были проанализированы данные по динамике индекса увлажнения АМІ (Annual Moisture Index) за период 60 лет с 1961 по 2019 гг., рассчитанного для метеостанций, находящихся в области климатического ареала темнохвойных лесов гор Южной Сибири. АМІ характеризует соотношение тепло- и влагоресурсов местообитаний и рассчитывается как отношение сумм градусо-дней периода с температурой выше 5°C к годовой сумме осадков.

Результаты

Исследования показали, что состояние древостоев определяется экологическими условиями их произрастания. До инвазии полиграфа усыхание древостоев было приурочено преимущественно к среднегорным (700–900 м над ур. м.) и частично высокогорным (1100–1200 м над ур. м.) ярусам рельефа (табл. 1), в низкогорье (300–500 м над ур. м.), как и в высокогорных (субальпийских) поясах южного макросклона Западного Саяна (1450–1500 м над ур. м.) и северо-восточного Алтая (1800–2000 м над ур. м.) массового усыхания деревьев не наблюдалось.

Существенное снижение устойчивости пихты было отмечено только в низкогорных древостоях, растущих на границе с г. Красноярском (отроги Восточного Саяна, 640–830 м у.м.). Необходимо отметить, что темнохвойные древостои, растущие на этих же высотах в горах Восточного Саяна (Джебский перевал, высота 820–830 м у.м.), как и на южном макросклоне Западного Саяна (880–1200 м над ур. м., в т.ч. хр. Арадан, Ойский), относятся к классу здоровых. Доля деревьев, усыхающих по специфическому для пихты сибирской «подверхушечному» типу в них не превышает 4%, повреждаются в основном деревья старшего возраста, как правило, значительно пораженные ржавчинным раком (*Melampsorella cerastii* Wint.).

Древостои на северных склонах Западного Саяна (хр. Кулумыс, Ойский, 800–1420 м у. м.), высокогорий хр. Хамар-Дабан (1100–1200 м ур. м.) и нагорья Кузнецкий Алатау (710–1250 м над ур.м.) ослаблены в различной степени.

Таблица 1

Жизненное состояние древостоев пихты сибирской, %

Характеристика местопроизрастания			Индекс жизненного состояния	Категория жизненного состояния
Горная страна	Высота ПП над ур.м., м	Экспозиция склона		
Хр. Хамар-Дабан	450–550	Долины рек	85,5 90,5–92,3	Ненарушенные
	1100–1190	Юз, сз	54,8–64,1	Поврежденные
Восточный Саян	450–520	Долины и верховья ручьев и рек, перевал водораздельные хребты	69,9–99,5	Поврежденные и Ненарушенные
	640–730		85,7–99,5	
	745–830		57,7–67,9	Поврежденные
Западный Саян	595–700 800–830 1420–1450	северные склоны, перевалы	81,1–94 36,4 55,4	Ненарушенные Поврежденные Поврежденные
	1150–1500	южные склоны,	80,0–81,5	Ненарушенные
Кузнецкий	567	Долины рек, св	92,3	Ненарушенные

Характеристика местопроизрастания			Индекс жизненного состояния	Категория жизненного состояния
Горная страна	Высота ПП над ур.м., м	Экспозиция склона		
Алатау	713–920 1000–1248	Юв, юз, сз	46,4–71,9 50,2–71,5	Сильно поврежденные и поврежденные
Северо-восточный Алтай	437–542	Долины рек	90,0–94,1	Ненарушенные
	770	Долины рек	71,4	Поврежденные
	1100–2000	Св, юз, ю	71,8–74,3	Поврежденные
		Св, юв, ю	89,4–98,2	Ненарушенные

Примечание: ПП – пробная площадь; юв – юго-восточные, юз – юго-западные, св – северо-восточные, сз – северо-западные, ю – южные склоны.

Ретроспективные исследования крон модельных деревьев показали, что усыхание пихты сибирской началось в восточной части ареала – деревья пихты, растущие в горах Хамар-Дабана, начали усыхать в 1960 г., массовые повреждения зафиксированы в 1976–1977 и в 1980–1982 гг. [2, 10]. На северном макросклоне Западного Саяна усыхание началось несколько позже – волны повреждения отмечены в 1978–1982, 1989, 1994–1996 и 1999 гг. В среднегорье Восточного Саяна усыхание шло достаточно неравномерно, отдельные деревья усыхают с 1973–1974, 1978, 1982–1985, 1991–1993, 1998–1999 гг. [5]. Начало массового повреждения пихты сибирской в западной части гор Южной Сибири приурочено к 1991 и 1999 гг. (Кузнецкий Алатау), в горах Северо-восточного Алтая – к 2003–2004 гг. [3–4].

Таким образом, в горах Алтае-Саянского экорегиона до инвазии уссурийского полиграфа можно выделить отдельные критические периоды начала массового усыхания пихты сибирской, когда повреждение деревьев наблюдалось в средне- и высокогорных поясах одновременно во всех или в нескольких горных системах: 1978, 1980–1982 и 1998–1999 гг.

Дискуссия

В настоящее время обсуждается ряд рабочих гипотез усыхания пихты лесов в горных экосистемах Сибири [1–2, 4, 6–8]. В качестве возможных причин гибели лесов рассматривают естественные факторы (вековые смены растительности, засухи, динамика древостоев, неблагоприятные почвенные условия, повреждения энтомофагами и фитопатогенами). Так, например, предполагается, что феномен снижения индекса жизненного состояния древостоев среднегорья на подветренных склонах восточных экспозиций северо-восточного Алтая может быть вызван дефицитом влаги [4]. В горных системах тепло- и влагообеспеченность и различия в их соотношении являются системообразующими факторами, определяющими высотно-поясные категории, состояние и продуктивность растительности. Если высотные градиенты температур воздуха примерно одинаковы с изменением высоты в разных формах рельефа, то на условия увлажнения трансформирующее влияние на западный перенос воздушных масс оказывает сложный горный рельеф [12]. Например, высокая (до 150 дн/год) повторяемость фенотермов на Телецком озере, обуславливает увеличение температуры и, вполне ощутимое снижение влажности в нижних частях подветренных склонов. Усыхание видов рода *Abies*, вызванное недостаточной влагообеспеченностью наблюдается также на Дальнем Востоке России [13] и в Восточных Гималаях [14].

В последние годы с недостатком увлажнения пытаются связать усыхание пихты и кедра в лесных экосистемах хр. Хамар-Дабан, а также Западного и Восточного Саяна (серия публикаций В.И. Харук с соавторами). Авторы основываются на позитивных корреляциях уменьшения ширины древесного кольца с водным стрессом, выраженным показателем SPEI [15], который, однако, не является экологической характеристикой ареалов различных категорий растительности. Усыхающие темнохвойные леса в горах Южной Сибири приурочены к северным наветренным склонам хр. Кулумыс и Ойский (Западный Саян), верхним частям хр. Хамар-Дабан. По условиям увлажнения средне- и высокогорные пояса наветренных склонов хребтов Западного Саяна и Хамар-Дабана, относятся к достаточно и избыточно влажным [11]. Нижний предел увлажнения ареала темнохвойных лесов в горах Южной Сибири определяется годовым индексом увлажнения АМІ, равным 2.25 (красная линия на рис. 1) [12]. Динамика индекса увлажнения по данным метеостанций, расположенных на высотах, где отмечается усыхание кедрово-пихтовых лесов, показала, что, несмотря на значительные межгодовые флуктуации, за последние 60 лет АМІ никогда не достигал значений, критических для существования этих лесообразующих пород (рис. 1). Таким образом, можно констатировать, что в горах Южной Сибири не отмечалось устойчивой тенденции к аридизации, а одно-двухлетние флуктуации изменения увлажнения не могли стать причиной массового усыхания спелых здоровых деревьев.

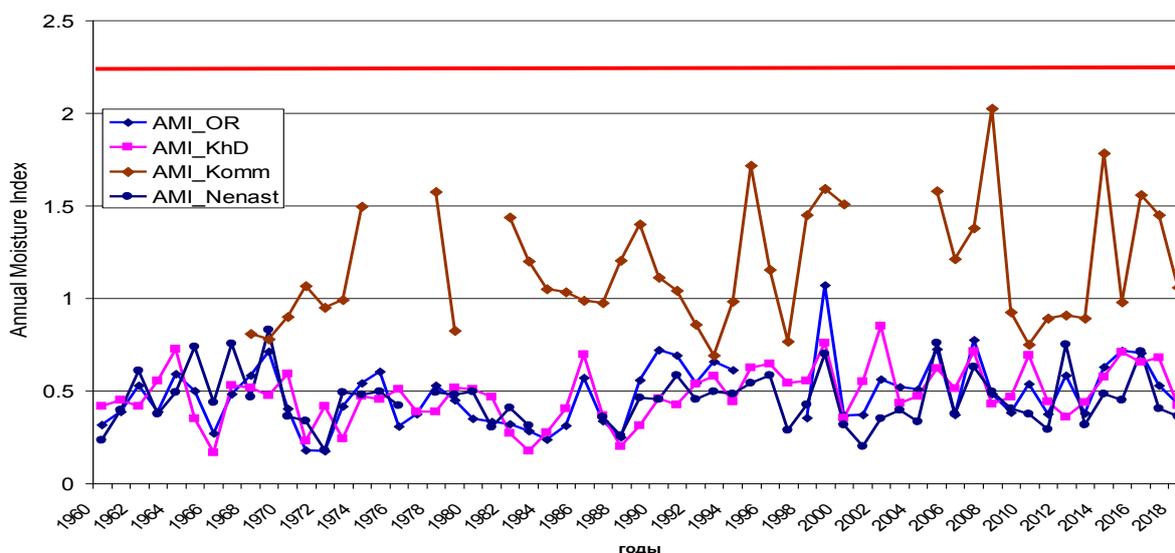


Рис. 1. Динамика индекса увлажнения АМІ для метеостанций Хамар-Дабан, Оленья Речка, Ненастная, Коммунар. Красная линия (АМІ = 2.25) показывает нижний/ южный предел увлажнения ареала темнохвойных видов по индексу увлажнения

В связи с все возрастающим техногенным воздействием роль триггера усыхания отводят также загрязнению атмосферы [1–4]. В пользу техногенной гипотезы свидетельствуют лишеноиндикационные исследования в лесных экосистемах Восточного и Западного Саян [16]. Повреждение деревьев в результате техногенного загрязнения, как правило, диагностируют по изменениям химического состава хвои [17]. В различных биогеографических районах Сибири наблюдаются флуктуации содержания химических элементов в хвое пихты сибирской [3–5, 18]. Установлено, что содержание техногенных элементов в хвое пихты сибирской почти всех районов ниже порога токсичности и не превышает величины, установленные для фоновых районов Сибири. Некоторое увеличение нормального уровня серы (0,12%), установленного для данного вида, наблюдалось в хвое пихты деревьев хр. Хамар-Дабан и отрогах Восточного Саяна [1, 5, 19]. Выявлена функциональная негативная зависимость между индексом жизненного состояния древостоев и содержанием алюминия в хвое пихты, у усыхающих деревьев также наблюдается резкое снижение содержания азота. Мы полагаем, что изменения соотношений техногенных и биофильных элементов и нарушение рядов их накопления, может привести к несбалансированным биохимическим реакциям и, как следствие, к нарушениям гомеостаза деревьев в том числе и на морфологическом уровне.

Изменения гомеостаза деревьев (при загрязнении, усыхании) провоцируют нарушения репродуктивных процессов. Во всех биогеографических районах доля полнозернистых семян у пихты составляет, как правило, 16–31% (табл. 2). Отмечается тенденция к резкому снижению их качества только в усыхающих горных древостоях и в непосредственной близости от источников загрязнения.

Масштабные усыхания видов р. *Abies* наблюдаются с начала XX столетия во многих регионах планеты [2, 13–14, 20]. В качестве основных причин рассматриваются климатические изменения, воздушное загрязнение, биотические эпифитотии и инвазии. Подчеркивается, что повышенная смертность пихтовых древостоев может определяться комплексом повреждающих факторов: вековыми сменами растительности, древностью данного рода, повышенной чувствительностью его к стрессовым условиям среды, в том числе и к загрязнению [1–5, 21].

Таблица 2

Качество семян пихты сибирской в различных биогеографических районах Алтае Саянской лесорастительной области (1991–2018 гг.)

Расстояние от источника загрязнения, км	Полнозернистые, %	Поврежденные энтомо-вредителями, %	Пустые и без зародыша, %	Масса 1000 шт. семян, г
Хр. Хамар-Дабан, 450 м над ур.м.				
10–15	6,2–36,7	18,5–40,0	44,4–54,2	5,1–8,4
70–75	14,3	59,1	26,6	6,3

Расстояние от источника загрязнения, км	Полнозернистые, %	Поврежденные энтомо-вредителями, %	Пустые и без зародыша, %	Масса 1000 шт. семян, г
115–120	9,4–27,1	22,1–61,1	29,5–50,8	9,1–10,2
125–130	3,4–14,9	54,9–63,1	22,0–38,7	7,0–8,3
Хр. Хамар–Дабан, 1100–1190 м над ур.м.				
120–125	0	6–11	89–100	3,8–8,6
Отроги Восточного Саяна, 450–520 м у.м.				
15–20	1–56	17–73	43–99	11,5
Восточный Саян, 830 м у.м. (хр. Кайдынский)				
28–30	0,3–4,6	1,3–90,5	9,2–94,1	3,0–6,1
Западный Саян, 450–520 м у.м.				
120–130	28–31	6,9–10,5	28,8–59,5	5,3–11,8
Западный Саян, 1100–1450 м у.м.				
190–200	0–16	5–66	10–71	5,9–7,2
Северо–восточный Алтай, 450 м у.м.				
более 200	20,1	50,2	29,6	8,0–11,2
Северо–восточный Алтай, 1100–2000 м у.м.				
более 200	16,6	56,8	26,5	7,1–9,1

В качестве возможных причин повреждения темнохвойных древостоев в горных экосистемах Сибири также рассматривается уменьшение уровня озона [22]. Однако, регистрация содержания озона над данным экорегионом организована только с 1974 г., резких и продолжительных снижений его содержания в этот период не наблюдалось. В тоже время, масштабное усыхание пихты наблюдается в течение 1970-х, а в восточной части ареала – с 1960-х гг. Очевидно, этот вопрос требует дальнейших исследований.

Заключение

Анализ пространственного распределения усыхающих древостоев показал, что зона массового усыхания темнохвойных лесов в горах Южной Сибири практически совпадает с границами избыточно влажного ВПК [11], индекс жизненного состояния снижается в подверженных техногенному загрязнению и усыхающих горных биоценозах. В этих древостоях наблюдались и устойчивые тенденции к снижению качества семян. Многолетнее ослабление деревьев пихты привело к нарушению их гомеостаза и катастрофическому усыханию в последние годы вследствие инвазии уссурийского полиграфа.

Исследования постоянно поддерживаются РФФИ (гранты № 99-04-48578, 01-04-06229, 11-04-00281), на данном этапе – проектом № 20-05-00540, а также госконтрактом 0356-2019-0024.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин В.И. Действие серосодержащих эмиссий на пихту сибирскую в Южном Прибайкалье: Автореф. дис.канд. биол. наук. Красноярск. 1989. 19 с.
2. Бажина Е.В., Третьякова И.Н. К проблеме усыхания пихтовых лесов // Успехи современной биологии. 2001. Т. 121. № 6. С. 626–631.
3. Бажина Е.В., Сторожев В.П., Третьякова И.Н. Усыхание пихтово-кедровых лесов Кузнецкого Алатау в условиях техногенного загрязнения // Лесоведение. 2013. № 2. С. 15–21.
4. Бажина Е.В. Жизненное состояние пихты сибирской и элементный состав ее хвои в лесных экосистемах северо-восточного Алтая // Региональная экология. 2017. № 2 (48). С. 18–25.
5. Бажина Е.В. Состояние древостоев пихты сибирской (*Abies sibirica*) и распределение химических элементов по ярусам ее кроны в лесных экосистемах ООПТ Красноярского края, Россия // Nature Conservation Research. Заповедная наука 2018. 3 (2). С. 40–53.
6. Kharuk V.I., Im, S.T., Oskorbin P.A., Petrov I.A., Ranson K.J. Siberian pine decline and mortality in Southern Siberia mountains // Forest ecology and management. 2013. V. 310 P. 312–332.
7. Petrov I. A., Shushpanov A. S., Golyukov A. S., Kharuk V. I. Pinus sibirica Du Tour response to climate change in the forests of the Kuznetsk Alatau Mountains // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2019 №. 5. P. 43–53 (in English with Russian abstract).
8. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Демидко Д.А., Петько В.М., Баранчиков Ю.Н. Распространение уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Сибири // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. Вып. 211. С. 33–45.
9. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

10. Третьякова И.Н., Бажина Е.В. Морфоструктура кроны и состояние генеративной сферы у пихты сибирской в нарушенных лесных экосистемах близ озера Байкал // Известия РАН. Сер. биол. 1995. № 6. С. 685–692.
11. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука. 1986. 226 с.
12. Tchebakova N.M., Blyakharchuk T.A., Parfenova E.I. Reconstruction and prediction of climate and vegetation change in Holocene in the Altai-Sayan mountains, Central Asia // Environmental Research Letters. 2009. 4 045025 (11pp). DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045025.
13. Манько Ю.И., Гладкова Г.А. О факторах усыхания пихтово-еловых лесов на Дальнем Востоке // Лесоведение. 1995. № 2. С. 3–12.
14. Donaubauer E. On the Decline of Fir (*Abies densa* Griff.) in Bhutan. Forest Decline in the Atlantic and Pacific Region/ R.F. Huettl, D. Mueller-Dombois (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. P. 332–337.
15. Vicente-Serrano, S.M. et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. Proc. Natl Acad. Sci. USA 110, 52–57 (2013).
16. Otnyukova T. Epiphytic lichen growth abnormalities and element concentrations as early indicators of forest decline// Environmental Pollution, 2007. V. 146. Is. 2: 359–365.
17. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение /(под ред. В.А. Алексеева). Л.: Наука, Ленинградское отделение. 1990. 200с.
18. Санина Н.Б., Чупарина Е.В., Нестерова А.А. Химический состав растительности Байкальского биосферного заповедника (в связи с проблемой деградации пихтовых лесов северного склона хр. Хамар-Дабан) // Сиб. экол. журн. 2004. № 1. С. 57–65.
19. Батраева А.А. Содержание серы в хвое пихты сибирской, как показатель загрязнения атмосферы // География и природные ресурсы. 1990. № 3. С. 66–70.
20. Fernandez I.J. Air pollution: synthesis of the role of major air pollutants in determining forest health and productivity. Stress physiology and forest productivity. Dordrecht; Boston; Lancaster: Martinus Nijhoff Publ., 1986. P. 217–239.
21. Антипов В.Г., Болотов Н.А. Отношение видов пихты к загрязнению воздуха промышленными газами. Защитное лесоразведение и лесные культуры. Воронеж. 1977. Изд-во ВГУ. Вып. 4. С.15- 21.
22. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Короткова Е.М., Павлинский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т.30. № 1. С. 27–34. DOI: 10.15372/AOO20170104.

**Белан Б.Д.¹, Ивлев Г.А.¹, Рассказчикова Т.М.¹, Симоненков Д.В.^{1*},
Толмачев Г.Н.¹, Козлов А.С.², Куйбида Л.В.², Воронцовская Н.Г.³,
Певнева Г.С.³**

**Многолетний ход химического состава атмосферного аэрозоля
в тропосфере юга Западной Сибири**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1
*E-mail: simon@iao.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения
им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти
Сибирского отделения Российской академии наук
634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4

В работе рассматриваются вариации химического состава тропосферного аэрозоля над фоновым районом юга Западной Сибири в 1997–2019 гг. Зондирование тропосферы от 500 до 7000 м над Караканским бором (юго-запад Новосибирской области) с почти ежемесячной периодичностью проводится с 1997 года по настоящее время с использованием самолета-лаборатории «Оптик-Э» на базе Ан-30 до 2011 года и Ту-134 «Оптик» в этом десятилетии. Пробоотбор аэрозоля производится на каждой высоте или в слоях: 500–1000, 1500–2000, 3000–4000, 5500–7000 м на фильтры Петрянова АФА-ХП/ХА-20. Последующий количественный анализ на содержание ионов и элементов выполнялся в Лаборатории мониторинга окружающей среды при Томском госуниверситете. На основании 1200 образцов проб (до 2019 г.) построен годовой ход определявшихся компонентов. Проанализирована их временная и пространственная изменчивость. Общая изменчивость концентрации неорганического компонента не превышает 2 порядка величины. Временная изменчивость концентрации микроэлементов может быть больше пространственной, достигая 4 порядков величины. Также представляются некоторые данные по органическому аэрозолю, экспериментальное исследование которого на самолете начато в текущем десятилетии.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль; пробоотбор; химический состав; ионы; элементы.

**Boris D. Belan¹, Tatyana M. Rasskazchikova¹, Denis V. Simonenkov^{1*},
Gennadii N. Tolmachev¹, Aleksandr S. Kozlov², Leonid V. Kuibida²,
Natalya G. Voronetskaya³, Galina S. Pevneva³**

**The long-term course of the chemical composition of atmospheric aerosol in
the troposphere of the south of Western Siberia**

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS
1, Academician Zuev square, Tomsk 634055, Russia
*E-mail: simon@iao.ru

²V.V. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
3, Institutskaya street, Novosibirsk, 630090, Russia

³Institute of Petroleum Chemistry SB RAS,
4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia

The paper considers variations in the chemical composition of the tropospheric aerosol over the background region of the south of Western Siberia in 1997 - 2019. Sounding of the troposphere from 500 to 7000 m above the Karakan pine forest (Novosibirsk region) with an almost monthly frequency is carried out from 1997 to the present using the Optic-E laboratory airplane based on the An-30 until 2011 and the Tu-134 Optik in this decade. Aerosol sampling is performed at each height or in layers: 500–1000, 1500–2000, 3000–4000, 5500–7000 m onto AFA-CP/CA-20 Petryanov filters. Subsequent quantitative analysis for the content of ions and elements was carried out at the Laboratory for Environmental Monitoring at Tomsk State University. Based on 1200 sample samples (until 2019), the annual cycle of the determined components was built. Their temporal and spatial variability is analyzed. The total variability of the concentration of the inorganic component does not exceed 2 orders of magnitude. Temporary variability of the concentration of trace elements can be more spatial, reaching 4 orders of magnitude. Some data are also presented on organic aerosol, an experimental study of which on an airplane began in the current decade.

Keywords: atmospheric aerosol; sampling; chemical composition; ions; the elements.

Введение

Аэрозоль является одной из наиболее важных и изменчивых компонентов атмосферы, оказывающих влияние на состояние климата как планеты в целом, так и отдельных ее регионов. Одним из основных параметров аэрозоля является его химический состав, который наряду с дисперсностью и структурой аэрозольного вещества определяет его физико-химические, оптические и прочие, в том числе санитарно-гигиенические, свойства. Объяснение всех сложных процессов, происходящих в атмосфере невозможно без подробной информации о спектре размеров аэрозольных частиц, их счетной и массовой концентрации, структуре, химическом и фазовом составе, а также пространственно-временной изменчивости этих характеристик. От химического состава частиц зависит их показатель преломления и, соответственно, закономерности рассеивания и поглощения солнечного излучения в атмосфере, определяя тем самым ее тепловой баланс, который в свою очередь играет первостепенную роль в формировании климата. В состав аэрозоля часто входят тяжелые металлы и другие, в том числе органические микрокомпоненты, обладающие канцерогенными и мутагенными свойствами. Растворение в облачных каплях частиц, содержащих сульфаты, ведет к образованию кислотных дождей, в конечном итоге пагубно действующих на всю ландшафтно-биологическую систему регионов, где они выпадают. Все это определяет высокую значимость исследований химического состава атмосферного аэрозоля, которые осуществляются во всем мире с нарастающей интенсивностью [1, 2].

Самолет-лаборатория может дать наиболее полную информацию о физико-химических свойствах аэрозоля в слоях атмосферы выше приземного. Такие лётно-экспериментальные исследования начали активно проводиться Институтом оптики атмосферы в 1980-е гг., сначала на самолете Ил-14; к концу 1980-х гг. самолет-лаборатория был адаптирован к носителю Ан-30 и сертифицирован как «Оптик-Э», далее – «Оптик-Эм» [3]. Однако в первую российскую пятилетку с 1992 г. было всего несколько эпизодов проведения лётно-экспериментальных кампаний. Возврат к почти ежемесячному характеру (10-12 зондировочных полетов в год) экспериментальных лётных исследований произошел в середине 1997 года после получения многолетнего гранта Международного научного фонда для мониторинга парниковых газов и исследования атмосферных процессов в фоновой тропосфере бореальной зоны внутриконтинентальной Евразии средних широт. С 2011 г. лётная программа продолжается на созданном совместно с СибНИА им. Чаплыгина самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» [4].

Материалы и методы

Исследовательские полеты проводятся в фоновом районе юга Западной Сибири над лесным массивом Караканский бор правобережья южной части Новосибирского водохранилища в тропосферном слое 500-7000 м. В ходе зондирования производится, в том числе изокинетический отбор проб атмосферного аэрозоля на фильтры Петрянова, при котором воздушный пробоотбор для анализа химического состава аэрозоля и измерения его счётной концентрации на самолете-лаборатории осуществляется за счет прямого надува в соответствующую систему набегающим при движении самолета на сопла пробоотборников потоком воздуха (проходящий объем которого после фильтров фиксируется газовыми счетчиками типа СГБ G 4-1) и разрежения, создаваемого на выходе из системы с помощью трубки Вентури. Отбор проб аэрозоля на фильтры АФА-ХП/ХА-20 производится на высотах и в слоях: 500–1000, 1500–2000, 3000–4000, 5500–7000 м. Временной интервал отбора каждой пробы, состоящей из

3 фильтров, варьируется от 5 до 15 минут. За такой период аспирации через каждый фильтр проходит от 2 до 7 м³ воздуха.

Последующее количественное определение основных неорганических компонентов аэрозольной матрицы – терригенных элементов, более десятка микроэлементов и ионов: Si, Al, Fe, Mg, Ca, Ti, Cu, Mn, Pb, Cr, Ag, Ni, V, Ba, Mo, B, Co, Be, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Br⁻, F⁻ производится ежегодно в химико-аналитической лаборатории Томского государственного университета. Используемые физико-химические метода количественного анализа и их характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Методы анализа аэрозоля, отобранного на фильтры АФА-ХП/ХА-20

Определяемый компонент (элемент, ион)	Метод определения	Порог обнаружения, мкг/ф-р	Погрешность, %
Al, Co, Cr, Mo, Ni, Ti, Zn, B, Si	Атомно-эмиссионный спектральный анализ	0,02	20
Ag, Ba, Cu, Pb, Sn, V, Mg, Mn		0,01	20
Fe, Ga, W		0,1–0,05	20
Ca, Cd		0,2–0,1	20
In		0,002	20
Na ⁺ , K ⁺	Пламенная фотометрия	0,2–0,10	10
Cl ⁻	Высокоэффективная жидкостная хроматография	0,20–0,10	10
SO ₄ ²⁻		2,00–0,60	15
NO ₃ ⁻		0,60	10
F ⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	Ионометрия	0,20	10

Также, после перевода самолета-лаборатории на новый носитель Ту-134 появилась возможность добавить дополнительный заборник для отбора проб органического аэрозоля на тефлоновые фильтромембраны Grimm 1.113. Первые 2–3 года отбиралась одна проба за стандартный полет – во всем исследуемом слое тропосферы от 500 до 7000 м. Доработка схемы такого пробоотбора и её реализации продолжаются: заменен побудитель расхода – безмасляный высокопомповый насос на ещё более мощный, что позволило увеличить объем прокачки и, соответственно, снизить порог обнаружения углеводородных паров аэрозолеобразующих соединений. За один полет теперь отбирается 2 пробы: в пограничном слое атмосферы (500–2000 м) и в свободной тропосфере (3–7 км). Ввиду высокой летучести органического аэрозоля каждая фильтропроба после отбора помещается в герметичный бюкс с ацетоном и этот экстракт анализируется хромато-масс-спектрометрически в лабораториях ИХКГ СО РАН и ИХН СО РАН [5].

Результаты и обсуждение

В целом, за весь период систематического экспериментального исследования над югом Западной Сибири с 1997 по 2019 год отобраны 1225 проб, из них 1205 проб по начало 2019 года – проанализировано на основную неорганическую номенклатуру ионов и элементов.

На рис. 1 представлен ход среднегодовых концентраций суммарной массы ионно-элементной компоненты аэрозоля с 1997 по 2018 год в разных тропосферных слоях над основным районом исследования.

Следует отметить, что средняя концентрация во всем тропосферном слое исследуемого района показала хоть и не ярко выраженный, но максимум за последние 10 лет. Однако, если раньше концентрационный пик неорганической компоненты всего слоя формировался в значительной степени за счет местных источников – за счет роста концентрации в слоях пограничного слоя региона, то за последние 2 года наблюдается тенденция сглаживания пиков по неорганической компоненте между слоями тропосферы и даже инверсионного расположения максимумов этих концентраций, что, с одной стороны, указывает на уже отмечавшуюся возрастающую вертикальную динамику атмосферы, но, с другой стороны, может свидетельствовать об усилении роли глобальных источников, транслируемых через дальний перенос. Чтобы прояснить роль отдельных неорганических компонентов, обратимся к рассмотрению межгодового хода ряда наиболее характерных из них. Поскольку традиционно наиболее часто для оценки происхождения того или иного элемента в составе аэрозоля путем геохимических соотношений в качестве репера используется один из трех элементов – алюминий, железо, кремний, в ряде случаев титан – то имеет смысл обратиться, по крайней мере, к рассмотрению хода одного из них. Думается, что небезосновательным критерием выбора характерного для нашего случая может быть наибольшая корреляция неорганической суммы с одним из них.

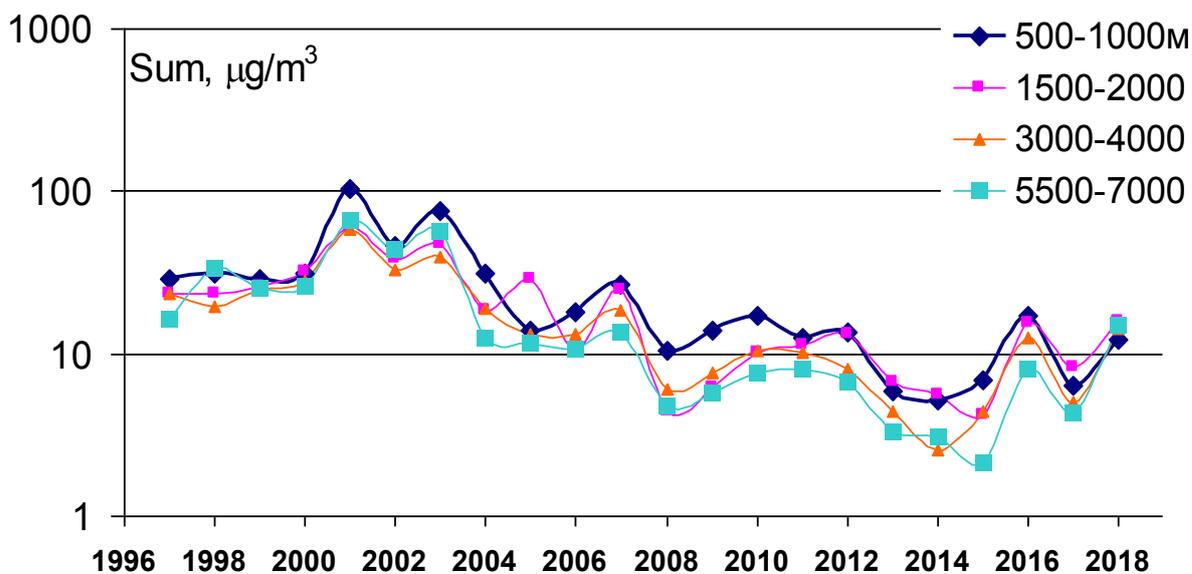


Рис. 1. Ход среднегодовых концентраций суммарной массы неорганических ионов и элементов в слоях тропосферы от 500 до 7000 м над Западной Сибирью с 1997 по 2018 г.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции массовой суммы ионов и элементов с концентрациями отдельных элементов в выборках для трёх характерных для региона воздушных масс (выборка для измерений за 2010–2018 гг.)

	<i>КУВ</i>	<i>КАВ</i>	<i>КСТВ</i>		<i>КУВ</i>	<i>КАВ</i>	<i>КСТВ</i>
N=	119	75	68	N=	119	75	68
<i>Высота</i>	-0,1892	-0,3726	-0,3698	<i>Ni</i>	0,4267	0,2447	0,423
<i>Al</i>	0,6039	0,3123	0,4531	<i>Pb</i>	0,4324	0,33	0,3559
<i>Ba</i>	0,5373	0,4661	0,4989	<i>Si</i>	0,5476	0,4087	0,6043
<i>Be</i>	0,3787	0,2722	0,2383	<i>Sn</i>	0,4301	0,2017	0,2678
<i>Ca</i>	0,5523	0,4906	0,6747	<i>Ti</i>	0,5199	0,2513	0,3534
<i>Cd</i>	0,1442	0,0653	0,2808	<i>V</i>	0,4402	0,3804	0,524
<i>Co</i>	0,1415	0,1826	0,0902	<i>Zn</i>	0,6032	0,2442	0,4817
<i>Cr</i>	0,4447	0,2901	0,225	<i>Zr</i>	-0,0349	0,0765	0,0071
<i>Cu</i>	0,5753	0,2501	0,3621	<i>Na⁺</i>	0,138	0,4086	0,4186
<i>Fe</i>	0,6329	0,514	0,6269	<i>K⁺</i>	0,0742	0,4987	0,4825
<i>Mg</i>	0,5721	0,6327	0,8008	<i>SO₄²⁻</i>	0,2077	0,5878	0,3815
<i>Mn</i>	0,7157	0,4105	0,2608	<i>NO₃⁻</i>	0,1475	0,4284	0,7413
<i>Mo</i>	0,1454	0,0862	0,4118	<i>Cl</i>	0,2942	0,5921	0,4487

Из таблицы 2 следует, что самые высокие коэффициенты корреляции с суммарной неорганической массой имеет элемент железо. Поэтому, имеет смысл обратиться к рассмотрению годового хода его концентрации, чтобы в первом приближении оценить межгодовую тенденцию динамики неорганической фракции тропосферного аэрозоля юга Западной Сибири.

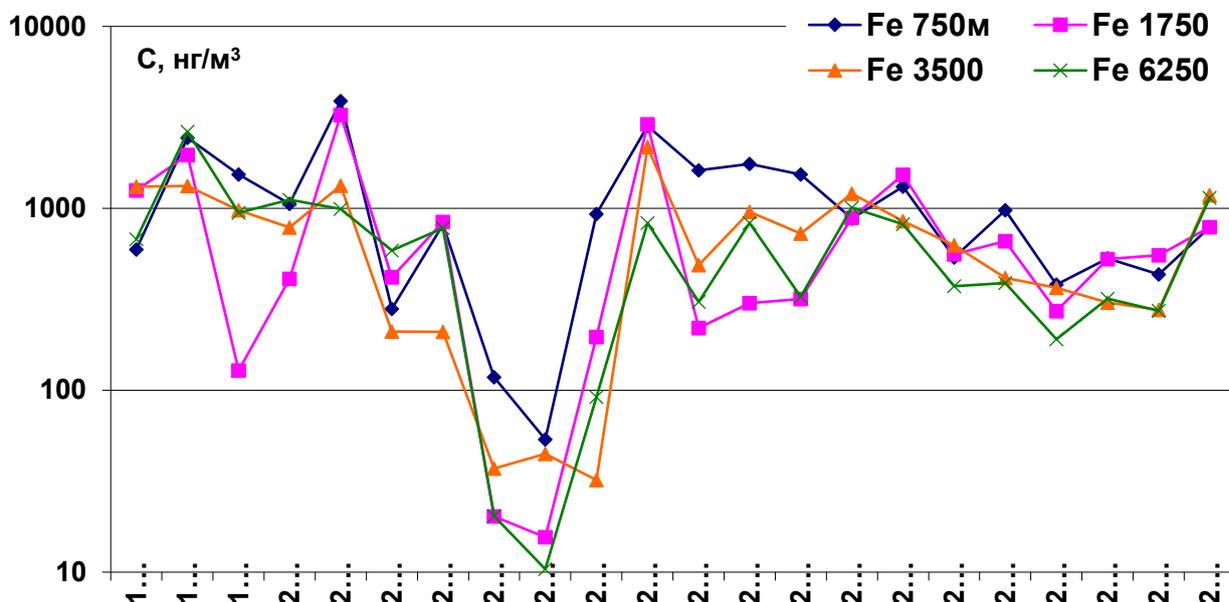


Рис. 2. Ход среднегодовой концентрации элемента железа в слоях тропосферы 500–1000 м (обозначение 750м), 1500–2000 м (1750), 3000–4000 м (3500) и 5500–7000 м (6250) над фоновым районом зондирования Караканский бор

Рисунок 2 демонстрирует, что межгодовая изменчивость может превышать 2 порядка величины, но среднегодовые концентрации для разных тропосферных слоев крайне редко выходят за рамки одного порядка, а в текущем десятилетии, как правило, не превышает 2–3 раза. Для конечного в текущей серии года измерений (2018) характерно практически совпадение пар среднегодовых концентраций смежных слоев ПСА и свободной тропосферы – для первых двух $0,78 \text{ мкг/м}^3$ и для вторых – около $1,15 \text{ мкг/м}^3$. Однако такая тенденция для среднегодовых концентраций железа имела место практически каждый второй год в текущем десятилетии, но с меньшей периодичностью в предшествующие годы летного эксперимента. Видимо, такой концентрационный ход отражает соответствующую малую периодичность атмосферных процессов через систему не всегда очевидных не прямых связей атмосферно-динамических процессов разного масштаба.

Схожее с железом распределение по слоям в конце измерительного периода имеют алюминий, медь и ряд микроэлементов. Наличие источников в регионе выявляет обратное распределение для никеля, ванадия, бария и катиона калия. Для летучего репера нефтегазоносных провинций ванадия практически всегда характерно его накопление в слоях пограничного слоя атмосферы региона (рис 3).

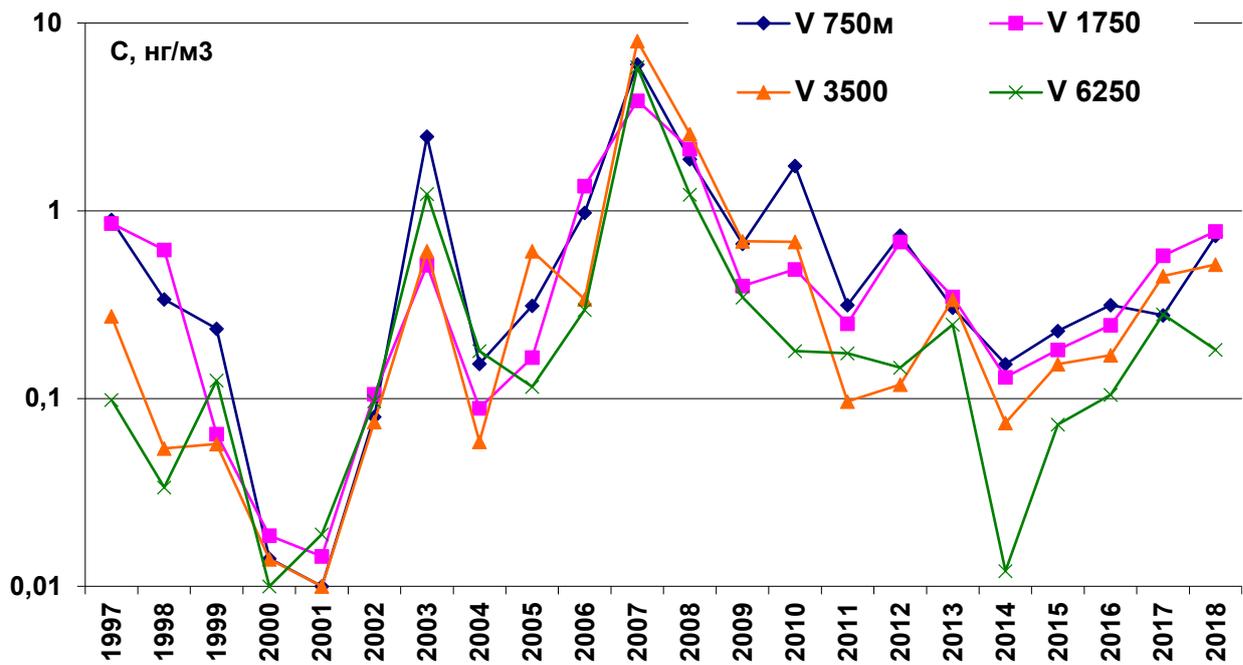


Рис. 3. Ход среднегодовой концентрации ванадия в слоях тропосферы региона

Последние три года наблюдается тенденция снижения ионных компонентов аэрозоля (за исключением катиона калия) во всех слоях тропосферы, особенно резко для кислородсодержащих ионов (рис. 4).

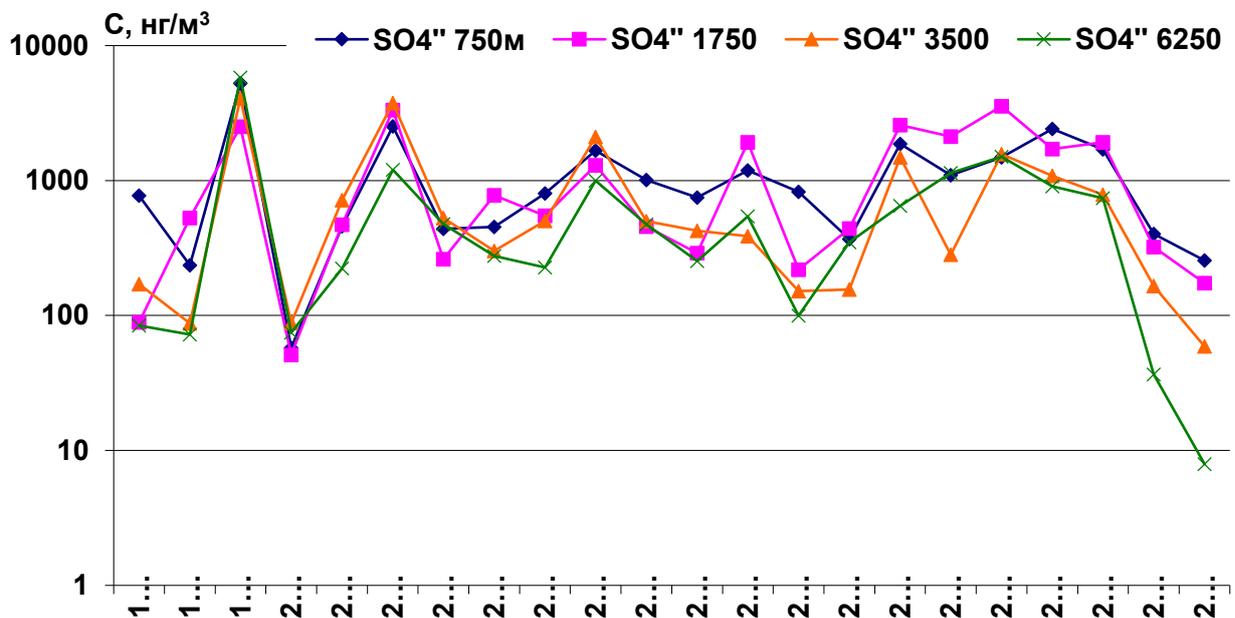


Рис. 4. Ход среднегодовой концентрации сульфат-аниона в слоях тропосферы региона

Всё более очевидно, что интенсивность образования нитратного и сульфатного аэрозоля в тропосфере связана с активностью солнца, что отражается в значимой синхронности хода среднегодовых концентраций этих анионов с соответствующими числами Вольфа (рис. 5).

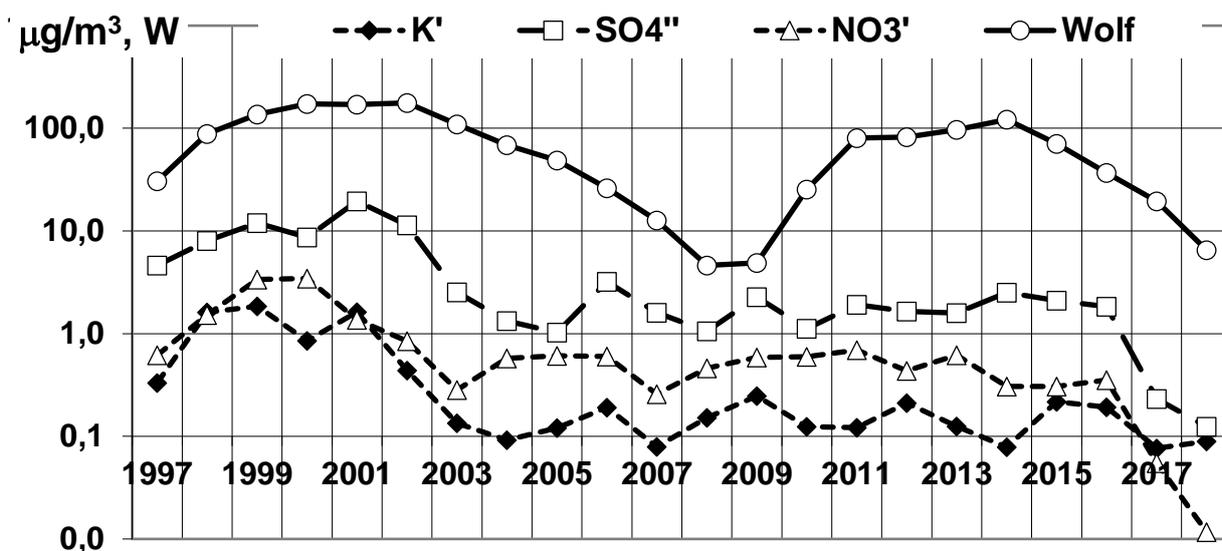


Рис. 5. Ход среднегодовых концентраций ряда ионов и чисел Вольфа

Ход калия видимо определяется суперпозицией как источников глобального характера, так и его эмиссией при процессах горения лесов региона, которые также подвержены в некоторой степени влиянию солнечной активности. Это может иметь подтверждение наличием значимых связей с числами Вольфа его концентраций в нижнем и верхнем тропосферных слоях зондирования

Таблица 3

Коэффициенты корреляции среднегодовых концентраций ряда ионов и элементов в разных слоях зондирования с числами Вольфа за период 1997–2018 гг. (для $n=22$ и $P=0,05$ $R_{zn.}=0,36$)

	500-1000м	1500-2000	3000-4000	5500-7000
K^+	0,3980	0,3220	0,2449	0,4568
NO_3^-	0,0351	0,3720	0,4653	0,5220
SO_4^{2-}	0,2428	0,3575	0,4514	0,3359
Si	0,4372	0,5275	0,5138	0,5198
Al	0,4885	0,6066	0,5836	0,4302
Sum	0,5530	0,6114	0,5998	0,6349

Для нитратов такая связь усиливается с высотой, для сульфата очевидно больше факторов её формирования. Не совсем ясны механизмы влияния солнечно-земных связей на терригенные элементы. Причем для кремния и алюминия такая связь по отмеченному уровню значимости наблюдается для всех слоев атмосферы, в которых производился пробоотбор.

На рисунке 6 представлен ход среднегодовых концентраций суммарной массовой концентрации неорганических компонентов аэрозоля и нормальных алканов во всём слое тропосферы, за все годы систематических наблюдений на самолете-лаборатории (неорганические пробы 2019 года проанализированы только для первого полета).

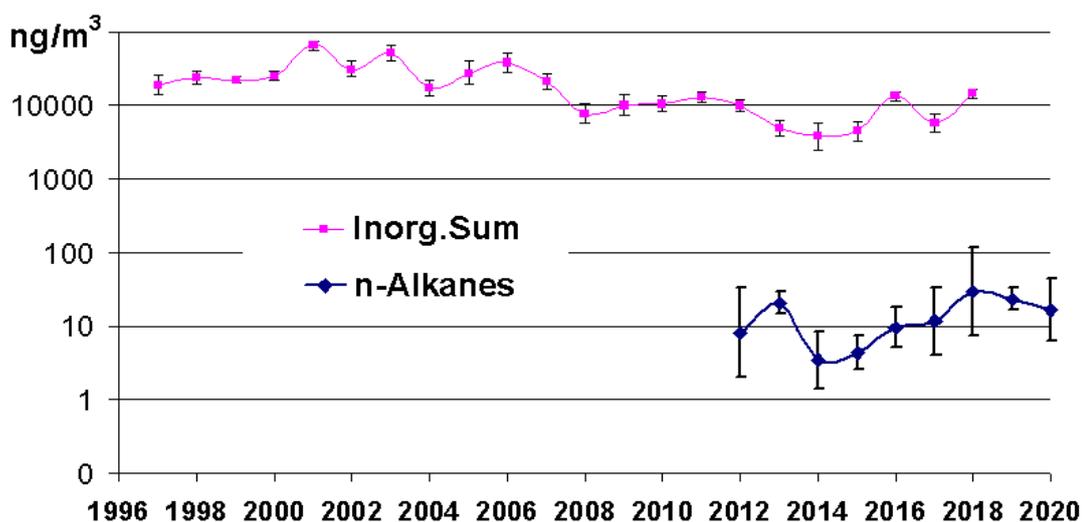


Рис. 6. Ход среднегодовых концентраций суммы неорганических компонентов за 1997–2018 гг. и определяемой углеводородной суммы n -алканов $C_8H_{18}-C_{32}H_{66}$ за 2012–2020 (1 квартал) гг. во всем слое тропосферы, с приведением достоверных интервалов ($P=0.95$)

Пока сложно судить о закономерностях межгодового хода выделенной углеводородной микрокомпоненты тропосферного аэрозоля, но уже очевидно, что внутригодовая изменчивость суммы n -алканов гораздо выше, чем у суммарной концентрации неорганического тропосферного аэрозоля. Скорее всего, являющийся предиктором вторичного аэрозоля углеводородный компонент по сравнению с неорганикой имеет более значительную вариабельность в тропосфере, связанную как с большим количеством его источников, и природных, и антропогенных, так и со значительной зависимостью механизмов его стока от атмосферных условий.

Заклучение

Формирование многолетнего хода неорганической компоненты тропосферного аэрозоля определяется разными факторами: в первую половину периода наблюдений значительна роль местных источников, о чём свидетельствовал рост концентрации в пограничном слое региона, но в последние годы наблюдается тенденция сглаживания концентраций неорганической компоненты между слоями тропосферы, что, с одной стороны, указывает на возрастающую вертикальную динамику атмосферы, но, с другой стороны, может свидетельствовать об усилении роли глобальных источников, транслируемых через дальний перенос. Интенсивность образования нитратного и сульфатного аэрозоля в тропосфере связана с активностью солнца, что отражается в значимой синхронности хода среднегодовых концентраций этих анионов с соответствующими числами Вольфа. Для нитратов такая связь усиливается с высотой, для сульфата имеется больше факторов её формирования. Не совсем ясны механизмы влияния солнечно-земных связей на терригенные элементы. Ещё сложнее судить о закономерностях межгодового хода суммы n -алканов. Можно пока констатировать, что внутригодовая изменчивость выделенной углеводородной микрокомпоненты тропосферного аэрозоля гораздо выше, чем суммарной концентрации неорганического тропосферного аэрозоля.

Исследования по анализу неорганического компонента аэрозоля проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-50024. Изучение углеводородной составляющей аэрозоля поддерживается грантом РФФИ № 18-45-700020. Работа по обеспечению вылета самолета-лаборатории поддерживается Глобальным экологическим исследовательским фондом для национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Физические свойства и химический состав // Оптика атмосферы и океана. 2002. № 2 (15). С.123–146.
2. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие. // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 07. С. 565–575.

3. Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Zhidovkin E.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Shamanaev V.S., Shmargunov V.P. Optik- ÉAN-30 aircraft laboratory: 20 years of environmental research // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2012. V.29. №1. P. 64–75. DOI: 10.1175/2011JTECHA1427.1
4. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сигов Г.П., Симоненков Д.В., Сеницын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофанов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 "Оптик" // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 09. С. 805–816.
5. Воронцовая Н.Г., Певнева Г.С., Головкин А.К., Козлов А.С., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Углеродный состав тропосферного аэрозоля юга Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 06. С. 496–505.

Белова Ю.В.¹, Филина А.А.^{2,3}, Никитина А.В.^{2,3,4*}

Изучение влияния природных факторов на продукционно-деструкционные процессы водных биоценозов

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный технический университет»
Россия, 344000, Ростов-на-Дону, Площадь Гагарина, 1

²Общество с ограниченной ответственностью «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров»
Россия, 347900, Таганрог, пер. Итальянский, дом 106

³Научно-технологический университет «Сириус»
Россия, 354340, Сочи, Олимпийский проспект, 1

⁴Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет»
Россия, 344006, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42
*E-mail: nikitina.vm@gmail.com

Статья посвящена разработке и исследованию математической модели продукционно-деструкционных процессов с использованием современных информационных технологий и вычислительных методов, позволяющей повысить точность прогнозного моделирования экологической обстановки мелководного водоема. Модель учитывает: движение водного потока; микротурбулентную диффузию; гравитационное осаждение загрязняющих примесей; нелинейное взаимодействие популяций фитопланктона; биогенный, температурный и кислородный режимы; влияние солености. Для дискретизации предложенной модели использовалась схема с весами, значительно сокращающая погрешность расчетов. Практическая значимость работы определяется программной реализацией модели и определением пределов и перспектив ее практического применения. Экспериментальное программное обеспечение разработано с использованием суперкомпьютерных технологий для математического моделирования возможных сценариев развития мелководных экосистем с учетом влияния внешних факторов. Модельная задача была реализована в расчетной области сложной формы – Азовское море в летний период. Программный комплекс включает модель гидродинамики, включающую уравнения движения в трех координатных направлениях.

Ключевые слова: математическая модель, продукционно-деструкционные процессы, фитопланктон, мелководные водоемы, программный комплекс.

Yulia V. Belova¹, Alena A. Filina^{2,3}, Alla V. Nikitina^{2,3,4*}

Research of natural factors influence on the production and destruction processes of aquatic biocenosis

¹ Don State Technical University
Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1

²Supercomputers and Neurocomputers Research Center
Russia, 347900, Taganrog, Italyansky lane, 106

³Scientific and Technological University «Sirius»
Russia, 354340, Sochi, Olympiyskiy prospekt, 1

⁴Southern Federal University
Russia, 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42
*E-mail: nikitina.vm@gmail.com

The paper covers the development and research the mathematical model of production and destruction processes using modern information technologies and computational methods that have improved the accuracy of predictive modeling of the ecological situation of a shallow water. The model takes into account: water flow movement;

microturbulent diffusion; gravitational deposition of contaminants; nonlinear interaction of phytoplankton populations; biogenic, temperature and oxygen regimes, and the influence of salinity. The scheme with weights was proposed for discretization of proposed model. It significantly reduced the calculation error. The practical significance of this work is software implementation of the model and the definition of limits and prospects its practical application. The experimental software was developed using supercomputer technologies for mathematical modeling of possible scenarios for development of shallow-water ecosystems taking into account the influence of external factors. The model problem was implemented in computational domain of complex shape – the Azov Sea – in summer. The software contains the hydrodynamical model including the motion equations in three coordinate directions.

Keywords: mathematical model, production and destruction processes, phytoplankton, shallow waters, software complex.

Введение

Многие исследования последних десятилетий касались разработки математических моделей для прогнозирования биогеохимических циклов как стохастических систем, например, работы таких ученых как Van Straten G. и Keesman K.J. [1]. Многочисленные модели были откалиброваны по данным наблюдений различными исследователями, такими как Park R.A., Bierman V.J., Jorgensen S.E., Perevaryukha A.Y. [2], Williams B.J. [3] и др. Большинство моделей содержат зависимость Michaelis-Menten – как предел усвоения питательных веществ фитопланктоном.

Постановка задачи

Математическая модель, описывающая продукционно-деструкционные процессы мелководного водоема, имеет вид:

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}q_i) = \text{div}(\mathbf{k}_i \text{grad} q_i) + R_i, \mathbf{k}_i = \{\mu_i, \mu_i, \nu_i\}, i = \overline{1, 10}, \quad (1)$$

где q_i – концентрация i -го элемента; \mathbf{U} – вектор скорости водного потока, $\mathbf{u} = \{u, v, w\}$; $\mathbf{U} = \mathbf{u} + \mathbf{u}_0$ – скорость конвективного переноса вещества; \mathbf{u}_0 – скорость осаждения i -го вещества; R_i – химико-биологический источник, где индекс соответствует: 1-3-концентрации водорослей *Chlorella vulgaris* (зеленая), *Aphanizomenon flos-aquae* (синезеленая) и *Skeletonema costatum* (диатомовая); 4 – PO_4 (фосфаты); 5 – POP (взвешенный органический фосфор); 6 – DOP (растворенный органический фосфор); 7 – NO_3 (нитраты); 8 – NO_2 (нитриты); 9 – NH_4 (аммоний); 10 – Si (растворенный неорганический кремний); μ_i, ν_i – коэффициенты диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Для описания химико-биологических источников были добавлены модели наблюдений вида [4]:

$$R_i = C_i(1 - K_{R,i})q_i - K_{D,i}q_i - K_{E,i}q_i, i = \overline{1, 3}; R_4 = \sum_{i=1}^3 s_P C_i (K_{R,i} - 1)q_i + K_{PN}q_5 + K_{DN}q_6;$$

$$R_5 = \sum_{i=1}^3 s_P K_{D,i}q_i - K_{PN}q_5; R_6 = \sum_{i=1}^3 s_P K_{E,i}q_i - K_{PD}q_5 - K_{DN}q_6;$$

$$R_7 = \sum_{i=1}^3 s_N C_i (K_{R,i} - 1) \frac{f_N^{(1)}(q_7, q_8)}{f_N(q_7, q_8, q_9)} \cdot \frac{q_8}{q_7 + q_8} q_i + K_{23}q_8;$$

$$R_8 = \sum_{i=1}^3 s_N C_i (K_{R,i} - 1) \frac{f_N^{(1)}(q_7, q_8)}{f_N(q_7, q_8, q_9)} \cdot \frac{q_7}{q_7 + q_8} q_i + K_{42}q_9 - K_{23}q_8;$$

$$R_9 = \sum_{i=1}^3 s_N C_i (K_{R,i} - 1) \frac{f_N^{(2)}(q_9)}{f_N(q_7, q_8, q_9)} q_i - K_{42}q_9; R_{10} = s_{Si} K_{D,3} q_3,$$

где $K_{R,i}$, $K_{D,i}$ – конкретные показатели фитопланктона рождаемости и смертности; $K_{E,i}$ – удельный коэффициент экскреции фитопланктона; K_{PD} – удельная скорость автолиза; K_{PN} – отношение фосфатизации; K_{DN} – коэффициент фосфатизации DOP ; K_{42} – удельная скорость окисления аммония до нитритов в процесс нитрификации; K_{23} – удельная скорость окисления нитритов до нитратов в процессе нитрификации; S_P , S_N , S_{Si} – это нормализация коэффициентов между N, P, Si , содержащихся в органическом веществе.

Скорость роста фитопланктона определяется следующими выражениями:

$$C_i = K_{N,i} \min\{f_P(q_4), f_N(q_7, q_8, q_9)\}, i = \overline{1,2}; C_3 = K_{N,3} \min\{f_P(q_4), f_N(q_7, q_8, q_9), f_{Si}(q_{10})\},$$

где $K_{N,i}$ – максимальная удельная скорость роста фитопланктона, $i = \overline{1,3}$.

Добавим начальные условия:

$$q_i(x, y, z, 0) = q_i^0(x, y, z), (x, y, z) \in \bar{G}, i = \overline{1,10}. \quad (2)$$

Предположим, что концентрация q_i :

на боковой границе σ : $q_i = 0$ ($U_n < 0$); $\frac{\partial q_i}{\partial n} = 0$ ($U_n \geq 0$), $i = \overline{1,10}$;

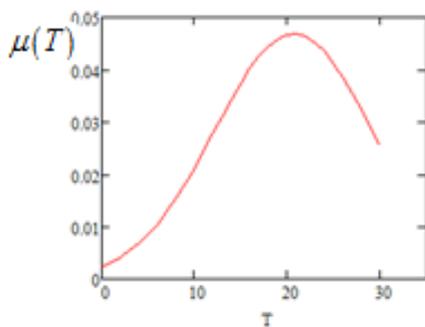
на дне Σ_H : $\frac{\partial q_i}{\partial z} = \varepsilon_{1,i} q_i, i = \overline{1,3}$, $\frac{\partial q_i}{\partial z} = \varepsilon_{2,i} q_i, i = \overline{4,10}$ (3)

на невозмущенной поверхности Σ_0 : $\frac{\partial q_i}{\partial z} = \varphi(q_i), i = \overline{1,10}$,

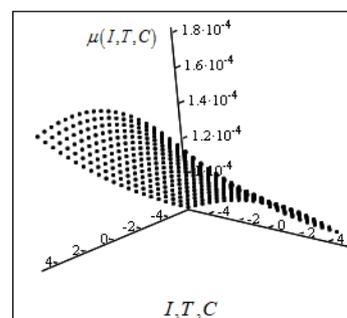
где φ – заданная функция; $\varepsilon_{1,i}, \varepsilon_{2,i}$ – неотрицательные константы: $\varepsilon_{1,i}, i = \overline{1,3}$, учитывают спуск водорослей на дно и их отложение; $\varepsilon_{2,i}, i = \overline{4,10}$, учитывает поглощение загрязняющих веществ донными отложениями.

В качестве входных данных для модели (1) – (3) использовалось поле скоростей водного потока, рассчитанное в работе [5].

Для описания химико-биологических источников были добавлены модели наблюдений [4]. Различные зависимости, используемые в моделях наблюдений для учета влияния солености (S), температуры (T) и освещенности (I) на функцию воспроизводства планктона в воде, представлены на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Функциональные зависимости моделей наблюдений

На рис. 1: а) $\mu(T) = \mu_0 \exp\left[-\left\{\frac{(T - T_{opt})}{\sigma_T}\right\}^2 - \mu_1 T + \mu_2\right]$; $T_{opt} = 25$; $\sigma_T = 12$; $\mu_0 = 0,12$; $\mu_1 = 0,06$; $\mu_2 = 0,43$;

б) $\mu(I, T, C) = \alpha_0 \exp(aT) \left(I / I_{opt}\right) \exp(1 - I / I_{opt}) \eta_0 \exp\left[-\left\{\frac{(C - C_{opt})}{\sigma_c}\right\}^2 - \eta_1 C + \eta_2\right]$
 $\alpha_0 = 0,8$; $a = 0,063$; $C_{opt} = 12$; $\sigma_c = 15$; $\eta_0 = 0,001$; $\eta_1 = 0,1$; $\eta_2 = 0,1$; $I = 10$; $I_{opt} = 86$.

Для задачи (1) – (3) после линеаризации (5) была осуществлена ее дискретизация на основе схемы [5], учитывающей частичную заполненность расчетных ячеек. Для решения возникающей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) использовался модифицированный попеременно-треугольный метод [6].

Для численной реализации задачи (1) – (3) был разработан программный комплекс (ПК). С использованием ПК рассчитывались поля скоростей водного потока, концентрация биогенных веществ, фитопланктона в районах со сложной геометрией дна (Азовское море). ПК предназначен для математического моделирования возможных сценариев развития экологической обстановки в прибрежных системах. В состав ПК входят вычислительные блоки, позволяющие: учитывать факторы, влияющие на распределение загрязняющих веществ в прибрежных системах; изучать зависимость концентраций загрязняющих веществ и размеров пораженной водной зоны от интенсивности водных потоков, гидрофизических параметров, климатических и метеорологических факторов. Особенности ПК являются высокая производительность, надежность и высокая точность результатов моделирования.

Последовательно сгущающиеся прямоугольные сетки размеров 251x351x15, 502x702x30, 1004x1404x60 и т.д. были использованы для математического моделирования гидробиологических и гидродинамических процессов в трехмерной области сложной формы (Азовское море).

В состав ПК входят следующие блоки: блок управления; океанологические и метеорологические базы данных; библиотека прикладных программ для решения задач гидробиологической сетки; интеграция с различными геоинформационными системами (ГИС); глобальная ресурсная база данных для привязки к географическим координатам и доступа к системам сбора спутниковых данных; база данных NCEP/NCAR. Использование спутниковой ГИС-информации дает дополнительные возможности для проведения более качественного и сложного пространственного анализа, а основанные на ней решения – более точные.

Результаты численного эксперимента

Проведены численные эксперименты по моделированию продукционно-деструкционных процессов в мелководном водоеме в весенне-летний период. Полученные поля значений концентрации солености и температуры Азовского моря в летний период использовались при моделировании динамики фитопланктонных популяций. На рис. 2, 3 приведены исходные и восстановленные изображения изолиний солености и температуры, полученные с помощью разработанного алгоритма интерполяции и путем наложения границ области.

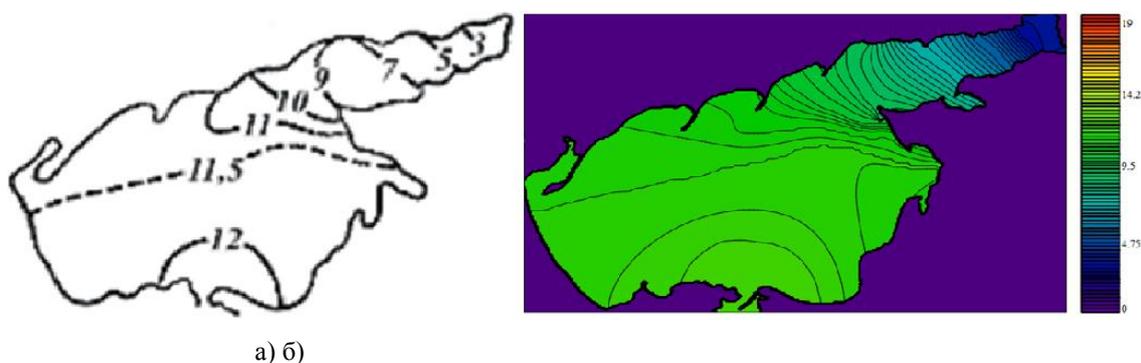


Рис. 2: а) исходное изображение изолиний уровня солености (изогалин) Азовского моря; б) восстановленное поле солености Азовского моря

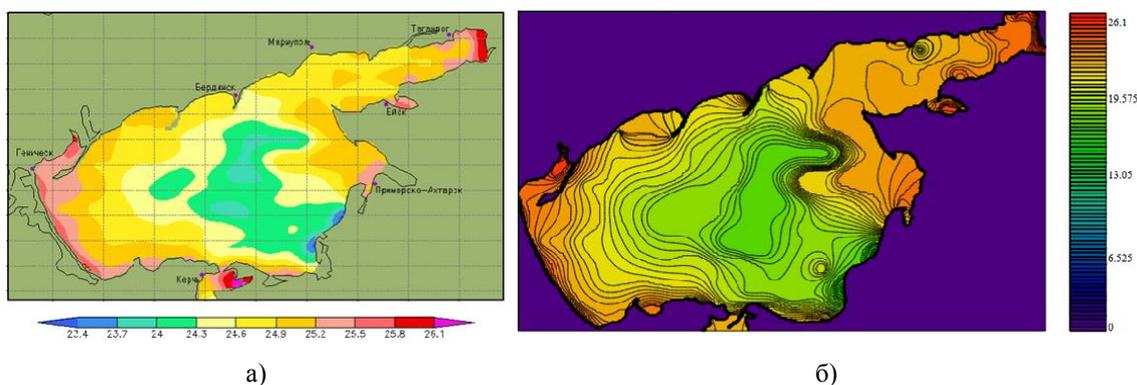


Рис. 3: а) исходное изображение изолиний температуры (изотерм) Азовского моря (июль 2019);
 б) восстановленное поле температуры Азовского моря

Влияние структуры водного потока Азовского моря на распределение концентрации фитопланктона представлено на рис. 4. Результаты расчета концентраций биогенных веществ (нитратов) на основе модели (1) – (3) приведены на рис. 5.

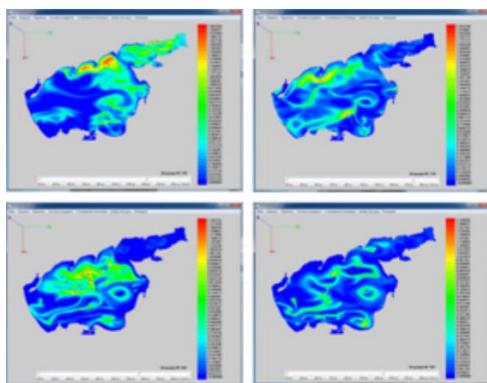


Рис. 4. Распределение концентрации фитопланктона (q_2) ($\mu_2 = 5 \cdot 10^{-11}$; $\nu_2 = 10^{-11}$)

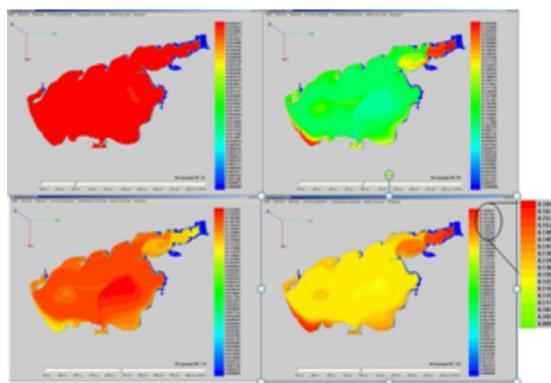


Рис. 5. Распределение концентрации нитратов (q_7) ($\mu_7 = 5 \cdot 10^{-10}$; $\nu_7 = 10^{-10}$)

Адекватность разработанной модели (1) – (3) оценивалась по критерию Тейла. Концентрации загрязняющих биогенных веществ и планктона, рассчитанные для различных ветровых условий, учитывались, если относительная погрешность не превышала 30% [1, 2, 5].

Проведен анализ аналогичных ПК. Результаты сравнения свидетельствуют о том, что точность прогноза изменения концентраций загрязняющих веществ и планктона в мелководных водоемах, построенных на основе разработанного ПК, увеличивается на 10 – 20% в зависимости от рассматриваемой задачи биологической кинетики.

Заключение

Изучены стехиометрические соотношения питательных веществ для различных видов фитопланктона. Рассмотрены модели наблюдений, описывающие потребление и накопление питательных веществ фитопланктоном. Разработана и исследована трехмерная математическая модель продукционно-деструкционных процессов, учитывающая трансформацию форм фосфора, азота и кремния в задаче эволюции фитопланктона, для мелководных водоемов. Аналитическое исследование разработанной в исследовании непрерывной модели позволило получить неравенства, обеспечивающие существование и единственность решения задачи. Исследовалось влияние природных факторов, таких как температура, соленость и освещенность на рост и гибель фитопланктона. Благодаря использованию графического ускорителя время расчета для решения модельной задачи было сокращено при сохранении требуемой точности для моделирования гидробиологических процессов мелководного водоема.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-51017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Straten G., Keesman K.J. Uncertainty propagation and speculation in projective forecasts of environmental change: a lake eutrophication example // J. Journal of Forecasting. 1991. No.10. P. 163–190.
2. Perevaryukha A.Y. Hybrid model of bioresources' dynamics: equilibrium, cycle, and transitional chaos // J. Automatic Control and Computer Sciences. 2011. V. 45. No. 4. P. 223–232.
3. Williams B.J.: Hydrobiological modelling / University of Newcastle, NSW, Australia, 2006.
4. Yakushev E.V., Arkhipkin V.S., Antipova E.A., Kovaleva I.N., Chasovnikov V.K., Podymov O.I. Seasonal and interannual variability of hydrology and nutrients in the northeastern Black Sea // Chemistry and Ecology, Taylor & Francis (United Kingdom), 2007 том 23, № 1, с. 29–41.
5. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Nikitina A.V., Lyashchenko T.V., Filina A.A., Litvinov V.N. The use of supercomputer technologies for predictive modeling of pollutant transport in boundary layers of the atmosphere and water bodies // J. Communications in Computer and Information Science. 2019. Vol. 1063. P. 225–241.
6. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E. Adaptive analog-SSOR iterative method for solving grid equations with nonselfadjoint operators // J. Math. Models Comput. Simul. 2012. Vol. 4. No. 4. P. 398–409.

**Бобылёв Л.П.^{1*}, Латонин М.М.^{1,2}, Башмачников И.Л.^{1,2},
Гнатюк Н.В.¹, Радченко Ю.В.¹**

**Арктическое усиление по данным наблюдений
и климатических моделей**

¹Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени
Нансена Россия 199034, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., д. 7

*E-mail: leonid.bobylev@niersc.spb.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»
Россия 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

Арктическое усиление – это более быстрые однонаправленные изменения приземной температуры воздуха в Арктике по сравнению с неполярными широтами. В данном исследовании рассматривается одно из определений Арктического усиления, которое подходит как для положительной фазы, так и отрицательной. Цель работы заключается в оценке величины Арктического усиления в виде временного ряда по глобальным сеточным данным наблюдений, реанализа и климатическим моделям из международного проекта CMIP5. Выявлено, что современное Арктическое усиление, начавшееся в 1980х гг., проявляется во всех базах данных, а глобальные климатические модели также успешно его воспроизводят. В то же время период потепления Арктики 1920–1940 гг., отмечаемый по данным наблюдений, не выявляется климатическими моделями, а данные реанализа его недооценивают.

Ключевые слова: Арктика; потепление климата; Арктическое усиление; приземная температура воздуха; изменчивость; тренды; климатические модели.

**Leonid P. Bobylev^{1*}, Mikhail M. Latonin^{1,2}, Igor L. Bashmachnikov^{1,2},
Natalia V. Gnatiuk¹, Iuliia V. Radchenko¹**

Arctic amplification in the observational data and climate models

¹Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre
Russia 199034, Saint Petersburg, 14th Line 7, Vasilievsky Island

²Saint Petersburg State University
Russia 199034, Saint Petersburg, Universitetskaya Emb. 7–9

*E-mail: leonid.bobylev@niersc.spb.ru

Arctic amplification is the more rapid, unidirectional changes in surface air temperature in the Arctic compared to non-polar latitudes. This study examines one of the definitions of the Arctic amplification, which is suitable for both positive and negative phases. This work aims to estimate the magnitude of the Arctic amplification in the form of a time series based on global gridded observational data, reanalysis, and climate models from the international project CMIP5. It was revealed that the present Arctic amplification, which has started in the 1980s, is manifested in all databases, and global climate models successfully reproduce it. At the same time, the period of Arctic warming in the 1920s–1940s detected according to the observational data, is not reproduced by climate models, and the reanalysis data underestimate it.

Keywords: the Arctic; climate warming; Arctic amplification; surface air temperature; variability; trends; climate models.

Введение

Арктическое усиление (АУ) является проявлением различий в функционировании климатической системы в высоких северных широтах и неполярных широтах. Инструментальные и палеоклиматические данные, а также проекции климатических моделей подтверждают существование этого явления для широкого диапазона временных и пространственных масштабов. В настоящее время под Арктическим

усилением понимают явление, характеризующееся более быстрыми однонаправленными изменениями и наличием более высоких амплитуд долгосрочной изменчивости приповерхностной температуры воздуха (ППТВ) в высоких широтах по сравнению со средними для Северного полушария или всего Земного шара. Например, в настоящее время скорость роста ППТВ в Арктике примерно вдвое выше среднеглобальной [1].

Среди наиболее хорошо изученных причин возникновения Арктического усиления являются климатические обратные связи. Будучи важным элементом системы Земли, климатические обратные связи играют менее стабилизирующую роль в полярных регионах, чем в тропиках: то есть параметры обратной связи менее отрицательные для отрицательных обратных связей и / или более положительные для положительных в полярных регионах по сравнению с тропиками [2, 3].

Цель работы заключается в численной оценке величины Арктического усиления в различных базах данных наблюдений, реанализа и климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана за период с начала 20-го века. Актуальность данного исследования заключается в получении новой информации о том, насколько хорошо воспроизводится глобальными климатическими моделями как современное Арктическое усиление, так и потепление Арктики в 1920–1940 гг., которое ограничено именно высокими северными широтами [4] и поэтому с физической точки зрения не является, скорее всего, проявлением Арктического усиления.

Данные и методы

Для вычисления величины Арктического усиления необходима только приповерхностная температура воздуха, для представления которой использовались сеточные интерполированные данные наблюдений и реанализ, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Данные наблюдений и реанализа ППТВ, покрывающие 20-й век

Данные	Ссылка	Разрешение сетки (шир. x дол.)	Доступные годы
NansenSAT	http://ru.niersc.spb.ru/page-64.html	2.5° x 2.5°	1900–2008
HadCRUT4	https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/	5° x 5°	1850–наст. вр.
GISTEMP v4	https://data.giss.nasa.gov/gistemp/	2° x 2°	1880–наст. вр.
Berkeley Earth	http://berkeleyearth.org/	1° x 1°	1850–наст. вр.
ERA-20C	https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-20c	Задаваемое пользователем до 0.25° x 0.25°	1900–2010

Данные NansenSAT покрывают регион 40°–90° с.ш., тогда как все остальные базы данных имеют глобальный охват. Поэтому база данных NansenSAT была объединена с HadCRUT4 для покрытия всего Северного полушария.

Были также загружены данные 9 глобальных климатических моделей CMIP5. Выбраны только те модели, где имеются как исторический, так и доиндустриальный контрольный эксперименты за период 1900–2004 гг. Эти эксперименты отличаются тем, как меняются во времени естественные и антропогенные внешние воздействия (форсинги): в контрольном эксперименте их величины заданы на доиндустриальном уровне и не меняются во времени, тогда как в историческом эксперименте их эволюция учитывается вместе с углеродным циклом. Выбранные модели представлены в таблице 2.

Выбранные для анализа модели CMIP5. Данные загружены с портала ESGF: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>

Номер	Модель	Горизонтальное разрешение (шир. x дол.)
1	BNU-ESM	2,7906° x 2,8125°
2	INM-CM4	1,5° x 2°
3	MIROC-ESM	2,7906° x 2,8125°
4	HadGEM2-CC	1,25° x 1,875°
5	HadGEM2-ES	1,25° x 1,875°
6	MPI-ESM-LR	1,8653° x 1,875°
7	MPI-ESM-MR	1,8653° x 1,875°
8	MPI-ESM-P	1,8653° x 1,875°
9	MRI-CGCM3	1,12148° x 1,125°

По данным наблюдений, реанализа и моделей CMIP5 была вычислена величина Арктического усиления, следуя метрике, использованной в [5] (основные метрики для Арктического усиления, предложенные различными исследователями, приведены в [6]). В нашей работе она рассчитывалась без наложения: за базовую изменчивость принималась температура внеполярных широт Северного полушария. В качестве границы Арктического региона была выбрана параллель 70° с.ш., ранее часто используемая в литературе как южная граница Арктического региона [5, 6]. Таким образом, в данном исследовании эта метрика основана на разности средневзвешенных по площади аномалий приповерхностной температуры воздуха в Арктике и неарктической области Северного полушария. Для выделения долгопериодной изменчивости результаты были сглажены скользящим средним с окном осреднения 11 лет.

Результаты

Полученные временные ряды величины Арктического усиления по сезонам и в среднегодовом выражении представлены на рисунке 1. Кривые для климатических моделей получены путём вычисления метрики АУ в каждой модели и последующего осреднения по всему ансамблю.

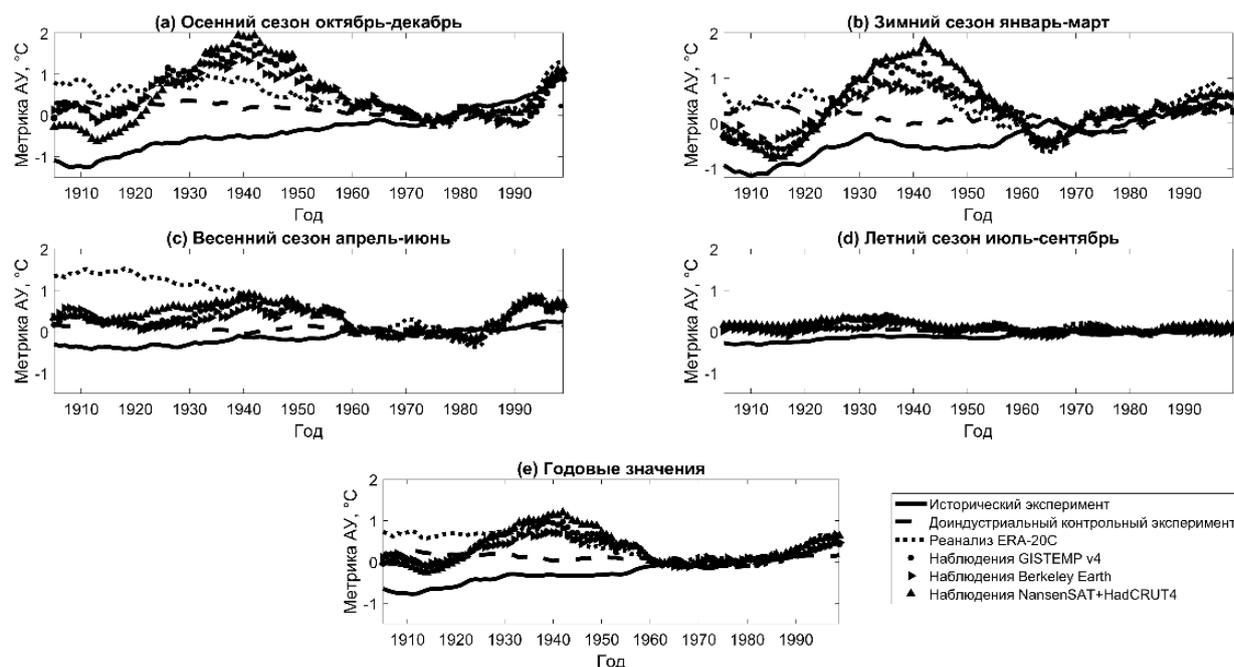


Рис. 1. Метрика Арктического усиления (АУ) по данным наблюдений, реанализа и среднего по ансамблю моделей CMIP5

Согласно данным наблюдений, ускоренные изменения ППТВ в Арктике наиболее выражены в осенний и зимний сезоны с октября по март, а похолодание 1960–1970 гг. заметно только в зимний сезон. Полученные результаты говорят о том, что современный период Арктического усиления успешно выявляется климатическими моделями CMIP5 в историческом эксперименте, и этот результат устойчив, так как получен для среднего по ансамблю из разных моделей. В то же время доиндустриальный контрольный эксперимент показывает отсутствие значимых отклонений от нуля, что подтверждает важнейшую роль внешних форсингов для возникновения Арктического усиления.

Однако потепление Арктики в 1920х–1940х гг. не выявляется моделями в обоих экспериментах, а реанализ существенно недооценивает его. Если рассматривать общий тренд, то в историческом эксперименте моделей CMIP5 положительные значения наступают только после начала 1980х гг., что указывает на отрицательный сдвиг в воспроизведении ППТВ в Арктике моделями, что особенно заметно при построении эмпирических кумулятивных функций распределения. Для воспроизведения возможности данного потепления за счёт внутренней изменчивости климатической системы необходим более длинный временной ряд, покрывающий как минимум несколько веков, поэтому доиндустриальный контрольный эксперимент в данном случае не очень показателен.

Очень важно подчеркнуть, как мы уже отмечали ранее, что с физической точки зрения потепление 1920х–1940х гг. наиболее вероятно не было проявлением Арктического усиления, так как эта аномалия относилась, главным образом, к Арктике и не была связана с глобальными однонаправленными изменениями ППТВ, характерными для современного периода. Данные различия показаны на рисунке 2 в виде глобальных распределений аномалий ППТВ для различных временных периодов.

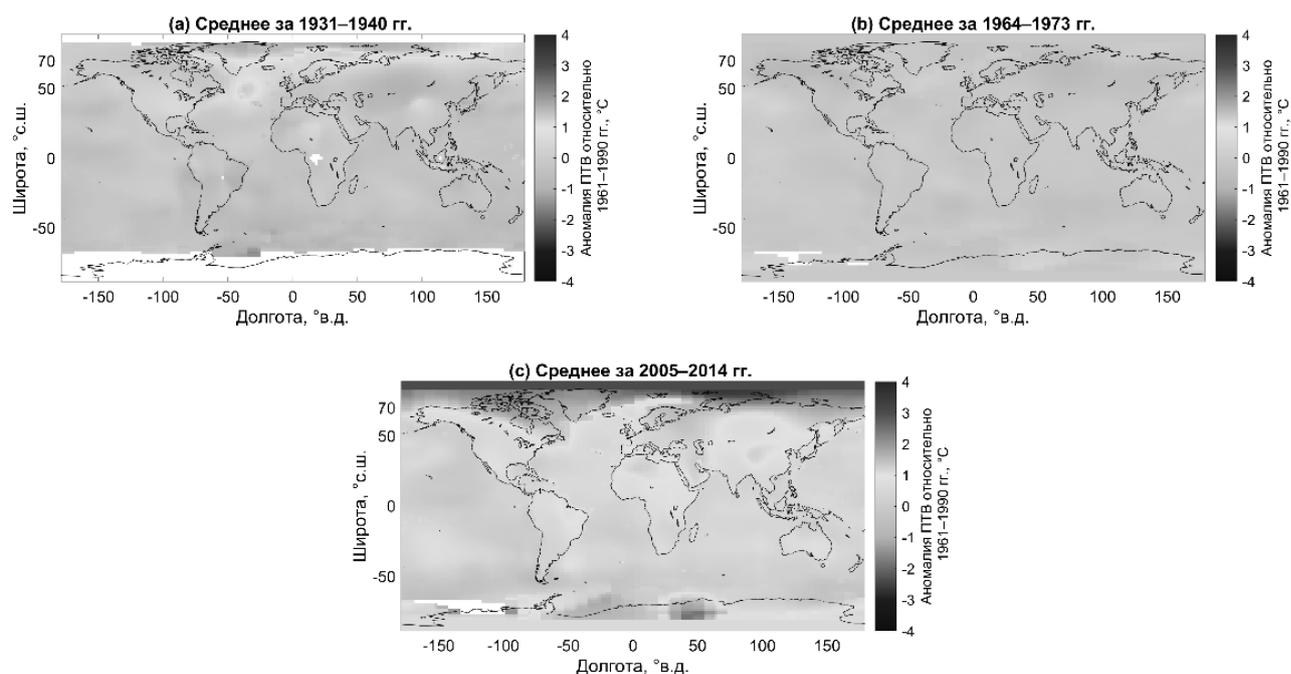


Рис. 2. Среднегодовые аномалии ППТВ по данным GISTEMP v4 (в пересчёте относительно климатической нормы 1961–1990 гг.) для трех периодов: (а) 1931–1940 гг., (б) 1964–1973 гг., (с) 2005–2014 гг. Белые пробелы означают отсутствие данных

Как видно, в среднегодовом выражении отрицательная аномалия 1960х–1970х гг. практически отсутствует, что следует также из графиков рисунка 1. Что касается двух рассматриваемых периодов потепления, 1920х–1940х гг. и современного, временные ряды аномалий ППТВ не могут отразить их принципиально различную природу. Потепление первой половины 20-го века ограничивалось высокими северными широтами, выше 70° с.ш., при этом во многих других регионах отмечались отрицательные температурные аномалии. Современное усиленное потепление в Арктике обусловлено Арктическим усилением глобального потепления, вызванного, в основном, увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, прежде всего углекислого газа.

Выводы

- 1) Показано, что данные наблюдений GISTEMP v4, Berkeley Earth и NansenSAT в сочетании с HadCRUT4 воспроизводят два периода потепления и один период похолодания в Арктике в 20-м и 21-м веках: потепление в 1920х–1940х гг., зимнее похолодание в 1960х–1970х гг. и современное потепление, являющееся проявлением глобального потепления, ускоренного явлением Арктического усиления, наблюдаемого с начала 1980х гг. и продолжающегося в настоящее время.
- 2) Данные реанализа ERA-20С значительно недооценивают потепление в начале 20-го века, однако хорошо согласуются с наблюдениями для последующих периодов похолодания и потепления.
- 3) Климатические модели CMIP5 в историческом эксперименте, включающем в себя как естественные, так и антропогенные воздействия, успешно воспроизводят только современное потепление, являющееся, как считается, в основном результатом внешних воздействий, в том числе антропогенных, и его усиление в Арктике. Предположительно это связано с тем, что модели неправильно воспроизводят некоторые процессы естественной долгосрочной изменчивости климата. В доиндустриальном контрольном эксперименте CMIP5 Арктическое усиление как явление отсутствует, что подтверждает важность внешних воздействий для его возникновения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90083.

ЛИТЕРАТУРА

1. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Global Planet. Change*. 2011. V. 77, № 1–2. P. 85–96. DOI:10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
2. Goosse H., Kay J.E., Armour K.C., Bodas-Salcedo A., Chepfer H., Docquier D., Jonko A., Kushner P.J., Lecomte O., Massonnet F., Park H.-S., Pithan F., Svensson G., Vancoppenolle M. Quantifying climate feedbacks in polar regions // *Nat. Commun.* 2018. V. 9, 1919. DOI:10.1038/s41467-018-04173-03.
3. Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. P. 181–184. DOI:10.1038/ngeo2071.
4. Yamanouchi T. Early 20th century warming in the Arctic: A review // *Polar Sci.* 2011. V. 5. P. 53–71. DOI:10.1016/j.polar.2010.10.002.5.
5. Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10, 014005. DOI:10.1088/1748-9326/10/1/014005.
6. Davy R., Chen L., Hanna E. Arctic amplification metrics // *Int. J. Climatol.* 2018. V. 38, № 12. P. 4384–4394. DOI:10.1002/joc.56757.

Варотсос К.А.^{1*}, Крапивин В.Ф.², Мкртчян Ф.А.²

**Новые информационно-моделирующие инструментальные технологии
для оперативной диагностики Арктических вод**

¹Кафедра физики окружающей среды и метеорологии Афинского университета,
Афины, Греция

*E-mail: covar@phys.uoa.gr

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук,
Москва, Россия

E-mail: vkrapivin_36@mail.ru

Предлагается новая инструментальная технология для оценки качества воды, основанная на сочетании спектральных измерений с помощью многоканальных оптических датчиков и математической модели распространения загрязняющих веществ в Арктическом бассейне. Охарактеризованы структуры адаптивного спектрофотометра и спектроэллипсометра и описаны их функции. Разработана пространственная имитационная модель динамики загрязнителей в Арктическом бассейне в максимальных границах, включая Норвежское и Берингово моря. Модель ориентирована на оценку распределения загрязнителей в акваториях арктических морей. Модель использована для изучения динамики тяжелых металлов, нефтяных углеводородов, фосфатов и других загрязняющих веществ. Модель описывает взаимодействия загрязняющих веществ с компонентами арктических экосистем, включая хлорофилл «а». Показано, что фрагментарные и эпизодические спектрофотометрические или спектроэллипсометрические измерения совместно с разработанной моделью обеспечивают реконструкцию распределения тяжелых металлов и нефтяных углеводородов во всех акваториях Арктического бассейна. Сформированы спектральные изображения ряда арктических акваторий.

Ключевые слова: Арктический бассейн, загрязнение, диагностика, качество воды, модель, спектрофотометр, спектроэллипсометр.

Costas A. Varotsos^{1*}, Vladimir F. Krapivin², Ferdinant A. Mkrtchan²

**New Information-Modeling Instrumental Technology for Operational
Diagnosis of Arctic Waters**

¹ Department of Environmental Physics and Meteorology, National and Kapodistrian University of Athens,
University Campus, Bldg PHYS-V, GR-157 84, Athens, Greece

*E-mail: covar@phys.uoa.gr

² Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences
Russia, 125009, Moscow, Mokhovaya str., 11, bild. 7

E-mail: vkrapivin_36@mail.ru

The new technology is being proposed as a tool for the water quality assessment based on coupled spectral measurements through multi-channel optical sensors and the mathematical model of pollutants extending into the Arctic Basin. The structures of the adaptive spectrophotometer and spectroellipsometer are reported and their functions are described. The spatial simulation model of pollutants dynamics in the Arctic Basin is developed to assess the distribution of pollutants in Arctic aquatories to maximum boundaries, including the Norwegian and Bering Sea. A model is adopted for the study of heavy metals, oil hydrocarbons, phosphates and other potential contaminants. The model describes the interactions of pollutants with the components of arctic ecosystems including chlorophyll "a". It is shown that fragmentary and episodic spectrophotometric or spectroellipsometric measurements together with the developed model provide reconstruction of the distribution of heavy metals and oil hydrocarbons in all Arctic Basin aquatories. Spectral images of the Arctic aquatories are formed.

Keywords: Arctic Basin, pollution, diagnostics, water quality, model, spectrophotometer, spectroellipsometer.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-07-00443-a.

Введение

Проблема загрязнения Арктического бассейна в связи с изменением климата была сформулирована академиком К.Я. Кондратьевым [1–3]. Основные источники поступления загрязняющих веществ в окружающую среду Арктики включают атмосферный транспорт, речной сток, судоходство и обмен водами с Атлантическим и Тихим океанами. Для комплексной оценки качества воды в Арктике К.Я. Кондратьевым с соавторами предложена геоэкологическая информационно-моделирующая система (ГИМС), ориентированная на обработку больших данных и анализ их динамики с учетом специфики климатических условий Арктики [1–5].

Дальнейшее развитие ГИМС направлено на организацию оперативного мониторинга качества арктических вод. Varotsos и др. [6] разработали две версии адаптивного идентификатора (АИ) для оперативного контроля качества жидких растворов с использованием измерений ослабления светового потока и преобразования в оптическом диапазоне от 340 нм до 910 нм. Этот инструмент имеет функцию адаптации к распознаванию оптических спектральных изображений. Инструментальная реализация АИ имеет две версии, основанные на 8-канальном спектрофотометре (АИ-8) и 35-канальном спектроэллипсометре (АИ-35) [6].

ГИМС-технология позволяет рассматривать арктическую среду как сложную систему Атмосфера-Северный Ледовитый океан с преодолением существенных неопределенностей, неизбежно возникающих при изучении арктической среды. Сочетая результаты эпизодических и фрагментарных измерений с данными моделирования, ГИМС-технология восстанавливает пространственное распределение концентраций загрязняющих веществ [3, 4, 6]. В данной работе на основе технологии ГИМС разрабатывается новый метод диагностики арктических вод, включающий реконструкцию спектральных изображений для арктических акваторий и алгоритмы решения обратных задач спектрофотометрии и спектроэллипсометрии.

Метод

Для достижения высокой точности определения качества воды в Арктике с учетом существующих ограничений для проведения натурных измерений предлагается новый метод, основанный на синтезе оптических устройств АИ-8, АИ-35 и имитационной модели гидрологических процессов. Каждый спектр, измеренный с помощью этих устройств, записывается с точностью 0,0001 для коэффициента преломления и чувствительностью измерения оптической передачи до 0,001%.

АИ-8 измеряет коэффициент ослабления света для каждой длины волны. АИ-35 предоставляет два параметра, отражающих спектроэллипсометрические углы Δ и Ψ , определяющих соотношение комплексных амплитудных коэффициентов отражения для p и s поляризаций соответственно [6, 7]. Измерения могут быть реализованы двумя способами: 1) АИ-8 имеет световой адаптер, который опускается в водную среду; 2) для использования АИ-35 необходимо взять образец воды.

Эффективность диагностики качества воды обеспечивается предварительным обучением АИ, которое заключается в формировании базы спектральных эталонов и создании алгоритмов распознавания спектральных изображений. В результате из этих инструментальных и программных средств формируется структура информационно-моделирующей системы с функциями оперативной диагностики водных объектов.

Идентификация спектрального изображения для исследуемой пробы воды осуществляется путем сравнения ее спектрального изображения со спектральными эталонами в базе данных. В зависимости от измерительного устройства спектральное изображение представляется одним спектром для спектрофотометра и двумя спектрами для спектроэллипсометра. Спектры аппроксимируются векторами, компоненты которых соответствуют параметрам спектра. Анализ векторного пространства осуществляется с использованием кластерного анализа или оценки расстояния между спектральными изображениями. Диагностика многокомпонентного водного раствора для определения концентрации загрязняющих веществ осуществляется путем решения следующих уравнений:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = T_i + \xi_i \quad (i = 1, \dots, m) \quad (1)$$

где x_j ($j = 1, \dots, n$) - концентрация j -го загрязнителя, T_i - значение спектра для i -й длины волны ($m = 8$ или 35 для спектрофотометра или спектроэллипсометра, соответственно); Значения коэффициентов $\{a_{ij}\}$ оцениваются во время обучения АИ [6, 8, 9].

Результаты

Адаптивный идентификатор использовался для измерений качества воды и формирования спектральных изображений для Охотского моря 19 февраля 2018 года и системы Ангара-Енисей летом 2010 года [4, 9]. Спектральные образы ряда акваторий Арктики формируются на основе использования модели GIMS-ABE [4]. Как показано на рис. 1 каждое арктическое море имеет уникальное спектральное изображение. Сравнение этих изображений позволяет оценить, что коэффициент ослабления освещения менее 0,45 для диапазона длин волн от 340 нм до 520 нм и больше 0,45 для 520 нм до 910 нм. Охотское море характеризуется ограниченным диапазоном коэффициента ослабления освещения от 0,32 до 0,5. Наблюдаемые различия могут быть объяснены специфической концентрацией хлорофилла в каждом водоеме. Этот вывод подтверждает рис. 2, где спектральные изображения Карского моря приведены для разных сезонов. Анализ ряда измерений показал, что кривые, отражающие изменение спектроэллипсометрических углов, зависят от биологической продуктивности.

В табл. 1 приведены результаты решения спектрофотометрической обратной задачи для выбранных водных объектов с использованием системы уравнений (1). Таким образом, концентрация загрязнителей арктических вод может быть оценена в режиме реального времени, если АИ-8 размещается на платформе. В этом случае адаптер солнечного света помещается в воду, и спектры получаются регулярно автоматически с периодичностью менее одной минуты. В других случаях спектральные измерения проводятся с использованием пробы воды. Знание типичных спектральных образов арктических акваторий помогает оптимизировать режим мониторинга. При этом модель GIMS-ABE может обеспечить пространственное распределение загрязняющих веществ с возможным прогнозом [4].

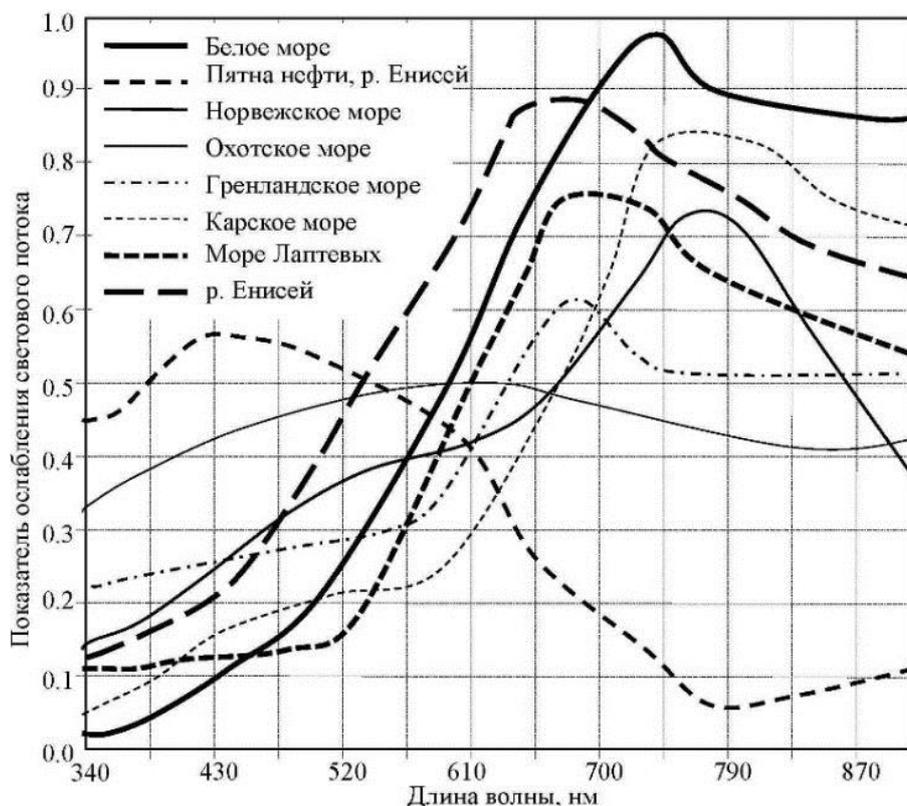


Рис. 1. Фотометрические спектральные изображения арктических водных объектов

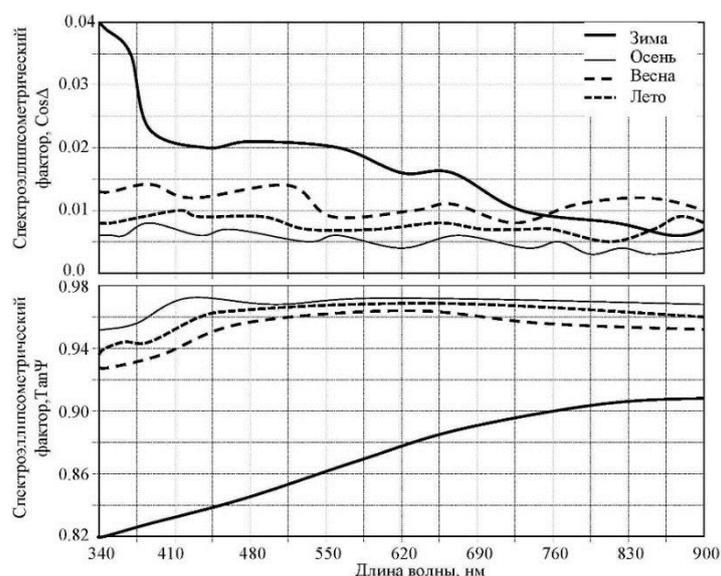


Рис. 2. Спектроэллипсометрические изображения Карского моря, зарегистрированные с помощью 35-канального АИ на основе данных моделирования [4, 6]

Выводы

Это исследование показывает, что существует метод оценки качества воды в Арктическом бассейне, основанный на комбинированном использовании оптических датчиков и алгоритмов обработки больших данных. Методологический подход предусматривает совместное применение спектральных оптических изображений, гидрологических и биологических моделей для реконструкции пространственного распределения загрязнителей в контролируемых арктических акваториях. Этот подход открывает перспективы для оптимизации режима мониторинга и сокращения уровня информационной неопределенности при анализе качества арктических вод. Оптический датчик АИ-8 может размещаться на стационарной или мобильной платформе и поставлять спектральные изображения с частотой до одной минуты.

Таблица 1

Концентрация загрязняющих веществ в отдельных водных объектах, реконструированных по их спектральным изображениям

Акватория	Тяжелые металлы, мг/л				Хлорофилл «а» мг/м ³	Р ₂ О ₅ мг/м ³	Нефтяные углеводороды, мг/л
	Cd	Pb	Cu	Zn			
Река Енисей	0.78	12.7	13.5	74.1	0.14	45.6	0.056
Карское море	0.24	14.1	24.8	44.3	0.23	34.1	0.027
Норвежское море	0.22	13.2	18.9	39.7	11.4	21.3	0.032

Учитывая функциональный потенциал АИ, необходимо рассмотреть следующие вопросы: (1) совершенствование гидрохимического блока модели ГИМС-АВЕ, ответственного за трансформацию загрязняющих веществ в экосистеме арктического моря; (2) разработка новых алгоритмов решения спектрофотометрических и спектроэллипсометрических обратных задач путем учета нелинейных зависимостей между концентрациями загрязняющих веществ и значениями спектральной кривой для отдельных длин волн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00443_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kondratyev K.Ya. Climatic effects of aerosol and clouds. / Springer/Praxis, Chichester, 1999, 264 p.
2. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Филлипс Г.В. Проблемы загрязнения высокоширотной окружающей среды. Научно-исследовательский Центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург. 2002. 279 с.
3. Bobylev L.P., Kondratyev K.Ya., Johannessen O.M. Arctic environment variability in the context of global change. / Springer/Praxis, Chichester, UK. 2003. 471 p.
4. Varotsos C.A., Krapivin V.F. Pollution of Arctic waters has reached a critical point: An innovative approach to this problem. // *Water, Air, & Soil Pollut.* 2018. 229(11). P. 1–14.
5. Varotsos C.A., Krapivin V.F. A new big data approach based on geocological information-modeling system. // *Big Earth Data.* 2017. 1(1-2). P. 47-63.
6. Varotsos C.A., Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A. New optical tools for water quality diagnostics. // *Water, Air & Soil pollution.* 2019. 230(8). P. 1–12.
7. Kovalev V.I., Kovalev V.V., Rukovishnikov A.I., Kovalev S.V. A Wide-range spectroscopic ellipsometer with switching of orthogonal polarization states based on the MDR-41// Monochromator. *Instruments and Experimental Techniques.* 2019. 62(6). P. 813–816.
8. Varotsos C.A., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Arctic latitudes environmental pollution effects. // *Proceedings of the 34th International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans*, 17-20 February 2019, Mombetsu, Hokkaido, Japan. Okhotsk Sea and Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Hokkaido, Japan. 2019. P. 418–421.
9. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. *New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making.* / Springer, London, UK, 2015, 903 p.

**Давыдов Д.К.¹, Дьячкова А.В.¹, Симоненков Д.В.¹,
Фофонов А.В.^{1*}, Максюттов Ш.Ш.², Белан Б.Д.¹**

**Применение автоматизированного камерного метода для
долговременных измерений газовых потоков в болотных экосистемах
Западной Сибири**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 634055, Томск, пл. Академика Зуева, 1
*E-mail: alenfo@iao.ru

²National Institute for Environmental Studies
Japan, 305-8506, Tsukuba, 16-2 Onogawa

Автоматизированные камерные системы, работающие в закрытом динамическом режиме, рекомендованы в качестве основного метода для измерений потоков парниковых газов на границе почва – атмосфера для станций входящих в систему ICOS (Integrated Carbon Observation System). В работе приводятся данные измерений сезонных потоков метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂) в характерных растительных ассоциациях на Бакчарском болоте в Томской области в теплое время 2014–2019 гг. с использованием автоматического камерного комплекса «Flux-NIES». Обсуждается межгодовая и пространственная изменчивость поглощения атмосферного углерода болотной растительностью и его эмиссии из торфяной залежи. Наблюдается связь этих процессов с уровнем увлажнения в болотных экосистемах.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс для измерения газовых потоков; газообмен на границе «почва - атмосфера»; болотные экосистемы.

**Denis K. Davydov¹, Alena V. Dyachkova¹, Denis V. Simonenkov¹,
Aleksander V. Fofonov^{1*}, Shamil Sh. Maksyutov²**

**Application of the automated chamber method for long-term measurements
CO₂ and CH₄ fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia**

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS
Russia, 634055, Tomsk, 1 Academician Zuev sq.
*E-mail: alenfo@iao.ru

²National Institute for Environmental Studies
Japan, 305-8506, Tsukuba, 16-2 Onogawa

Wetland CO₂ and CH₄ fluxes were observed at the Bakchar bog, West Siberia. Measurements were performed by solar powered automated system (Flux-NIES) with six chambers installed along transect. Observations were made during the May to October period in 2014 to 2019 at the open sedge bog (E-site). Correlation analysis made it possible to describe the dependences for CO₂ and CH₄ fluxes on the local hydrometeorological conditions of the surface. Gases fluxes were correlated spatially: higher net uptake CO₂ and CH₄ emissions are observed at wet mesotrophic locations with higher photosynthesis and respiration rates; lower net uptake CO₂ and CH₄ emissions were observed into meso-oligotrophic landscape.

Keywords: automated chamber method; terrain-atmosphere gases exchange, water content in peatlands.

Введение

Понимание причин изменения климата Земли и планирование необходимых мероприятий по предотвращению катастрофических последствий требуют долгосрочных и высокоточных измерений выбросов – стоков парниковых газов и их эволюции. Стандартизированные измерения и расчет газовых потоков увеличивают доступность и удобство использования накопленных данных для моделирования происходящих процессов. Автоматизированные камерные системы, работающие в закрытом динамическом режиме, рекомендованы в качестве основного метода для измерений потоков парниковых

газов на границе почва – атмосфера на станциях мониторинга входящих в систему ICOS (Integrated Carbon Observation System) [1].

Камерные измерения потоков малых газовых составляющих (trace gases) между поверхностью суши и атмосферой проводятся уже почти 100 лет. Различные методы исследований, в том числе статические и динамические, применяются при расчете потоков основных парниковых газов. Однако все они имеют определенные недостатки, которые либо мешают дать адекватную оценку процессам обмена, либо ограничивают диапазон их использования. Камерные методы относительно дешевы и просты в эксплуатации и в сочетании с использованием методов математического моделирования могут быть адаптированы для широкого спектра исследований от локальных до глобальных пространственных масштабов. Стандартизация камерных измерений облегчает их применение в различных сетях мониторинга разнообразных наземных экосистем.

Углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4) являются парниковыми газами, которые чаще всего контролируются с использованием камерного метода. CO_2 является одним из наиболее распространенных и важных газов в системе суша – океан – атмосфера. Он имеет как природные, так и антропогенные источники. В естественном углеродном цикле CO_2 играет ключевую роль в ряде биологических процессов (фотосинтез, дыхание и т. д.). Концентрации CO_2 в атмосфере увеличились на 40% – с 278 млн⁻¹ в 1750 до 406 млн⁻¹ в 2017 году [2].

CH_4 также обладает сильным парниковым эффектом и играет важную роль в определении окислительной способности тропосферы и истощении стратосферного озона. Он имеет как природные, так и антропогенные источники. По-прежнему существует много регионов с источниками CH_4 , которые слабо изучены. К малоизученным территориям относятся и обширные районы Российской Арктики, где наличие природных водно-болотных угодий и использование ископаемого топлива приводят к значительным выбросам CH_4 в атмосферу. За тот же промежуток времени, что и наблюдаемый рост содержания CO_2 , концентрация CH_4 в атмосфере увеличилась на 150% – с 722 млрд⁻¹ в 1750 году до 1859 млрд⁻¹ в 2017 году [2].

Таким образом, концентрации CO_2 , CH_4 и других парниковых газов увеличились в атмосфере с до-индустриальных времен из-за антропогенных выбросов, связанных со сжиганием ископаемого топлива, используемого в качестве источника энергии и с изменениями в землепользовании. Наблюдаемые изменения в концентрации CO_2 и CH_4 в атмосфере являются результатом нарушения динамического баланса между антропогенными выбросами и естественными процессами, которые приводят к частичному удалению этих газов из атмосферы [3].

Камерные измерения полезны при определении временных и пространственных неоднородностей потоков парниковых газов, при разделении суммарных потоков CO_2 на их компоненты (дыхание/поглощение) и т.д. Использование автоматизированных систем для изучения газовых потоков на границе почва – атмосфера позволяет проводить точные измерения, независимо от погоды и времени суток, с минимальными нарушениями поверхности почвы и получать данные с высоким разрешением в течение продолжительных периодов времени, например как в работе [4].

Средства и методика измерений

Измерительный комплекс «Flux-NIES» с 6 автоматическими камерами разработан совместно National Institute for Environmental Studies (NIES, Цукуба, Япония) и Институтом оптики атмосферы СО РАН (ИОА, Томск, Россия) в начале 2000-х гг. для исследования потоков метана и диоксида углерода на границы «почва-атмосфера» [5]. С тех пор его состав неоднократно изменялся и модернизировался. В настоящее время на полевом стационаре «Plotnikovo» эксплуатируются два почти идентичных комплекса (рис. 1).

В качестве газоанализатора CH_4 в состав измерительного оборудования включен модифицированный полупроводниковый сенсор TGS-842 (Figaro Inc., США) с чувствительным элементом на основе кристалла диоксида олова - касситерита (SnO_2) [6]. Для измерения концентраций CO_2 используется недисперсионный инфракрасный NDIR-газоанализатор LI-820 (Licor Inc., США). Подача пробы воздуха от камер к приборам газоанализа осуществляется нагнетающим насосом типа N86KN (KNF Neuberger GmbH, Германия) по системе полиэтиленовых трубок (Ø 4 мм) и пневмоэлектрических клапанов. Управление измерительным комплексом, сбор и сохранение информации осуществляется через дата-логгер CR1000 (Campbell Sci., США).

Большое внимание при осуществлении газоанализа уделяется подготовке воздушной пробы: очистке от твердых аэрозольных фракций, осушению и стабилизации потока и температуры в приборах.

Для этого в измерительный комплекс «Flux-NIES» последовательно включены (рис. 1): фильтры тонкой очистки (15 и 7 мкм), регулятор давления (RPV), регулятор потока воздушной пробы (MFC), система сбора и слива конденсата (WT и S), нафионовый осушитель (Nafion), и финальные химические порошковые осушители ($Mg(ClO_4)_2$ и P_2O_5).

Для автономного функционирования комплекса в качестве бесперебойного источника электроэнергии используется набор аккумуляторных батарей, подзарядка которых осуществляется в дневное время солнечными панелями или ветровой турбиной.

Контроль основных параметров окружающей среды осуществляется стандартным набором метеорологических датчиков: атмосферного давления RX2760 (OMEGA, США), скорости и направления ветра 05103VM (R.M. Young Com., США), пиргеометр/радиометр PIR (Eppley Lab., США), пиранометр солнечной интегральной радиации PCM-21 (Kipp&zonen, Нидерланды), измеритель уровня осадков 52202H (R.M. Young Com., США), температуры и относительной влажности атмосферного воздуха HMP45A (VAISALA, Финляндия). Дополнительные измерения температуры почвы регистрируются отдельно термохронами iBotton DS1921G (Maxim Integrated, США), а уровень грунтовых вод измеряется датчиками HOBO U20-001-04 (Oneset Comp. США) на различных болотных участках.

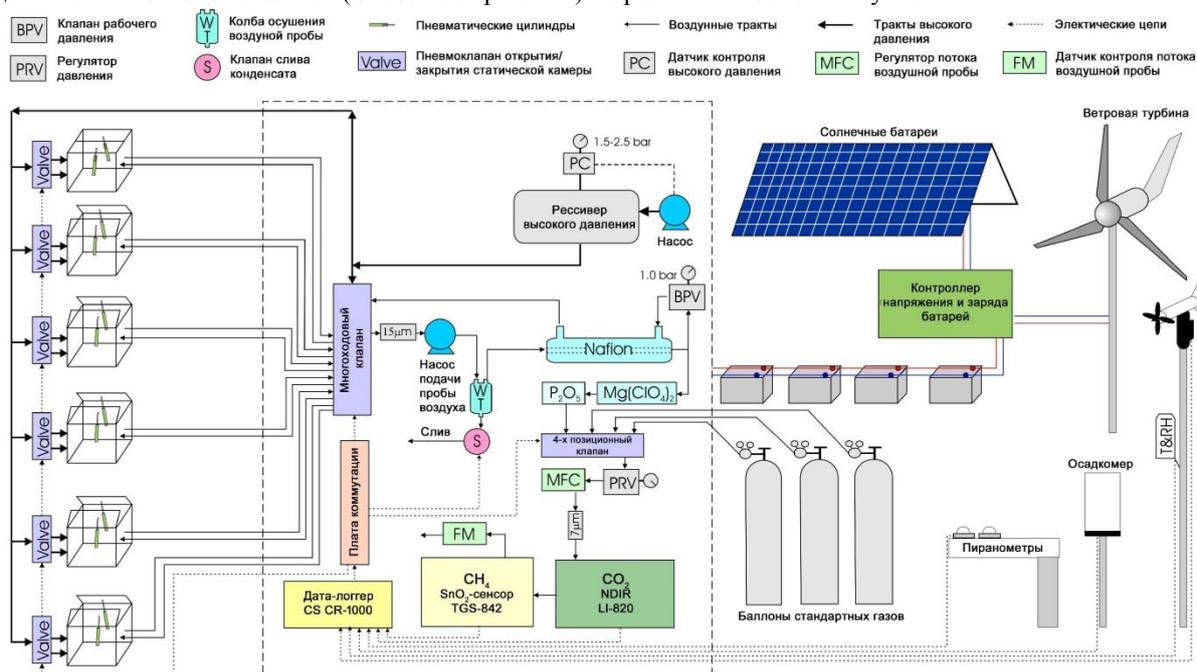


Рис. 1. Схема автоматического камерного комплекса «Flux-NIES»

Методика измерений основана на регистрации изменения концентрации исследуемого газа внутри кратковременно изолируемой от атмосферы камеры (рис. 1). Анализируемый воздух по трубкам через управляемый многоходовый клапан выбора камеры подается на газоанализаторы. Клапан высокого давления (BPV) разделяет поток воздуха из рабочей камеры на два, меньший из которых (~20 мл/мин) поступает на блок газоанализаторов, а оставшаяся часть по обратной трубке возвращается в камеру, чем достигается постоянство давления воздуха внутри камеры [5].

В нормальном состоянии все камеры открыты, кроме одной (рабочей), из которой производится отбор воздуха на газоанализ. Очередность работы камер, продолжительность и время их открытия-закрытия определяются программой управления в логгере.

Для определения чувствительности газоанализаторов в измерительном комплексе «FluxNIES» дважды в сутки используется процедура калибровки по стандартным газовым смесям. Концентрации CO_2 и CH_4 в трех баллонах (в нейтральной среде чистого синтетического воздуха в атмосферных пропорциях) подобраны таким образом, что в первом случае они заведомо превышают наибольшие концентрации этих газов, достижимые в рабочих (закрытых) автоматических камерах, во втором сопоставимы с атмосферными фоновыми значениями, а в третьем являются очень низкими. По измеренной разности сигналов газоанализаторов $dC(t)$ определяется текущее значение коэффициента калибровки прибора $S(t)$ (млн⁻¹/мВ), которое в идеале должно быть постоянным. Однако, анализ циклов калибровки (в течение

всего периода измерений) показал, что полученные значения $S(t)$ для используемых газоанализаторов непостоянны и зависят от внешних погодных условий, поэтому возможна дополнительная их коррекция.

Для NDIR CO_2 -газоанализаторов найдена значимая корреляция сигнала с атмосферным давлением P (гПа). На измерения CH_4 в большей степени влияют изменения температуры окружающей среды T ($^{\circ}C$) и связанные с ней флуктуации потока воздушной пробы через анализируемый объем.

Для уменьшения вариативности $S(t)$, результаты измерений были скорректированы с использованием найденных зависимостей по следующим формулам:

$$\begin{aligned} S_{CO_2}(t_k) &= \Delta C_{CO_2} / (dC_{CO_2}(t_k) + K_{CO_2} \times (P_0 - P(t_k))), \\ S_{CH_4}(t_k) &= \Delta C_{CH_4} / (dC_{CH_4}(t_k) + K_{CH_4} \times (T_0 - T(t_k))), \end{aligned} \quad (1)$$

где t_k время калибровки, ΔC_{CO_2} и ΔC_{CH_4} максимальные разности концентраций в стандартных газовых смесях, K_{CO_2} и K_{CH_4} эмпирические коэффициенты, P_0 и T_0 исходные давление и температура окружающей среды.

Для наиболее точного определения величины газовых потоков при обработке изменения выходных сигналов газоанализаторов $dC(t)/dt$ ($mB \times сек^{-1}$) в режиме закрытой камеры использовался метод наименьших квадратов с определением линейности процесса по коэффициенту парной корреляции R . Ширина окна фильтрации данных определялась по максимальному значению R^2 , что соответствовало наибольшим значениям фиксируемых эмиссии/стока исследуемых газов на границе почва – атмосфера.

Для удобства дальнейшего анализа данных в измерении газовых потоков принято переходить к весовым характеристикам ($mg \times m^{-2} \times час^{-1}$), которые вычисляются по известной формуле:

$$F(t) = S(t) \times dC(t)/dt \times M / 8312.6 / (273.15 + T) \times P \times 100 \times V / S \times 3600, \quad (2)$$

где M молярное число газа, V и S объем и площадь основания применяемых камер.

Место проведения измерений

Измерения проводились на полевом стационаре «Plotnikovo» Института почвоведения и агрохимии СО РАН (ИПА, Новосибирск, Россия) на Бакчарском болоте в Томской области в теплое время года (с мая по октябрь). Измерительная площадка, обозначенная литерой «Е», находится примерно в 16 км от поселка Плотниково Бакчарского района [7]. Координаты площадки $56^{\circ}51'$ с.ш., $82^{\circ}51'$ в.д.

На рис. 2 представлены спутниковый снимок и схема расположения автоматизированного комплекса измерительных камер «Flux-NIES» на болотной площадке «Е».

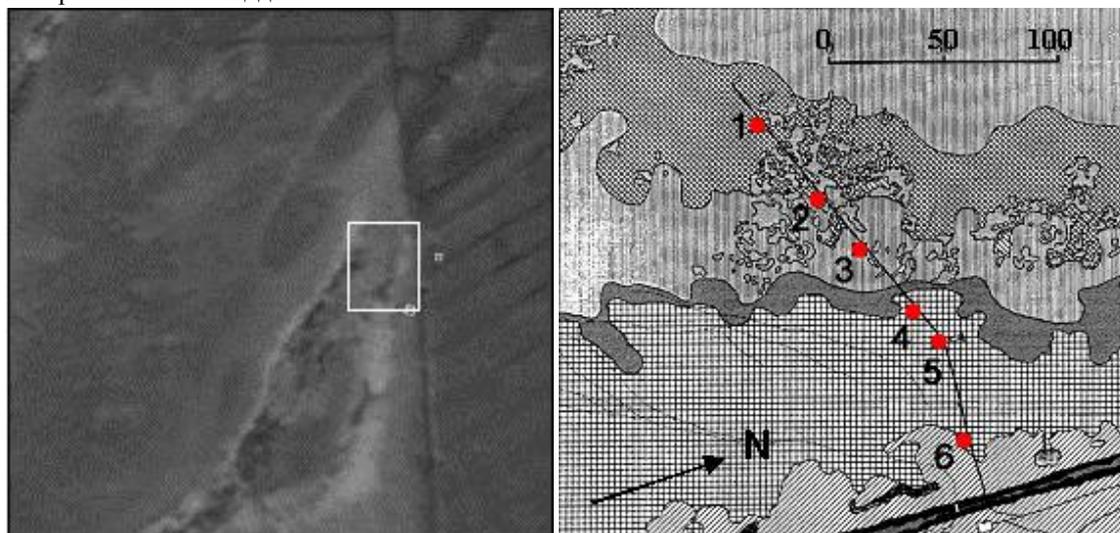


Рис. 2. Космический снимок местности и схема расположения автоматизированного комплекса измерительных камер «Flux-NIES» на болотной площадке «Е»

Таблица 1

Растительные ассоциации на измерительной площадке «Е»

Камера	Тип растительности	Увлажнение почвы
№1	Хвошево-сфагновое (<i>S. fallax</i>) мезотрофное сообщество	Высокое
№2	Вахтово-сфагновое (<i>S. majus</i>) мезотрофное сообщество	Высокое
№3	Осоково-сфагновое (<i>S. balticum</i>) олиго-мезотрофное сообщество	Выше среднего
№4	Пушицево-осоково-сфагновое (<i>S. balticum</i>) мезо-олиготрофное сообщество	Среднее

Камера	Тип растительности	Увлажнение почвы
№5	Кустарничково-осоково-сфагновое (<i>S. magellanicum</i>) мезо-олиготрофное сообщество	Среднее
№6	Сосново-кустарничково-осоково-сфагновое (<i>S. magellanicum</i>) олиготрофное сообщество	Ниже среднего

Удельные потоки метана определялись при помощи автоматического камерного метода согласно рекомендациям ICOS [1]: шесть одинаковых камер из оргстекла ($0,9 \times 0,9 \times 0,5$ м³) установлены на увлажненной части открытого мезотрофного болота, покрытого в основном травой и мхом. Они были расставлены на различных участках болотного микрорельефа таким образом, чтобы тип подстилающей поверхности на каждом из них соответствовал характерной растительной ассоциации.

В таблице 1 приведены характеристики микрорельефа для каждой камеры.

Результаты измерений и их анализ

На рисунке 3 представлены результирующие газовые потоки на границе почва – атмосфера полученные в ходе измерительных кампаний последних лет. Анализ данных показывает, что наиболее продуктивный метаногенез и поглощение CO_2 в болотных растительных ассоциациях наблюдались для камер 1–3, относящихся к центральному участку открытой топи. Наименьшая эмиссия метана зафиксирован в низком ряме (камера 6).

Сезонное поглощение CO_2 из атмосферы значительно варьируется год от года, как для отдельных растительных ассоциаций, так и для экосистемы в целом. Например, суммарные показатели стока CO_2 на болотную поверхность в 2017 году значительно превысили величины, наблюдавшиеся в измерительном сезоне 2016 (рис. 3).

Причины такого разброса в поглощении атмосферного углерода болотной поверхностью кроются в погодных условиях конкретного года наблюдений. Хотя болота трудно рассматривать как страдающие от засухи территории, сезоны пониженного уровня стояния почвенных вод здесь так же наблюдаются, что сказывается на продуктивности местных растительных ассоциаций.

На рисунке 4а приведена запись многолетних сезонных показателей уровня почвенных вод (WL) по данным датчика HOBO U20-001-04 установленного на измерительной площадке «Е». Подробный межсезонный анализ данных WL в таблице 2 выявил высокую значимую корреляцию поведения почвенных вод в 2014 и 2017гг., когда наблюдался наиболее эффективный сток CO_2 в болотных экосистемах (рис. 3).

Однако, для средних показателей потоков углеродного обмена критерий сезонных колебаний WL не столь надежен. Например, при схожих значениях стока CO_2 в 2015 и 2019гг. корреляции в поведении почвенных вод за эти годы не наблюдалось. Вместе с тем в 2019 году колебания WL показали исключительную корреляцию с другими измерительными сезонами, что заставляет считать его эталонным по данной характеристике исследуемой болотной экосистемы (табл. 2).

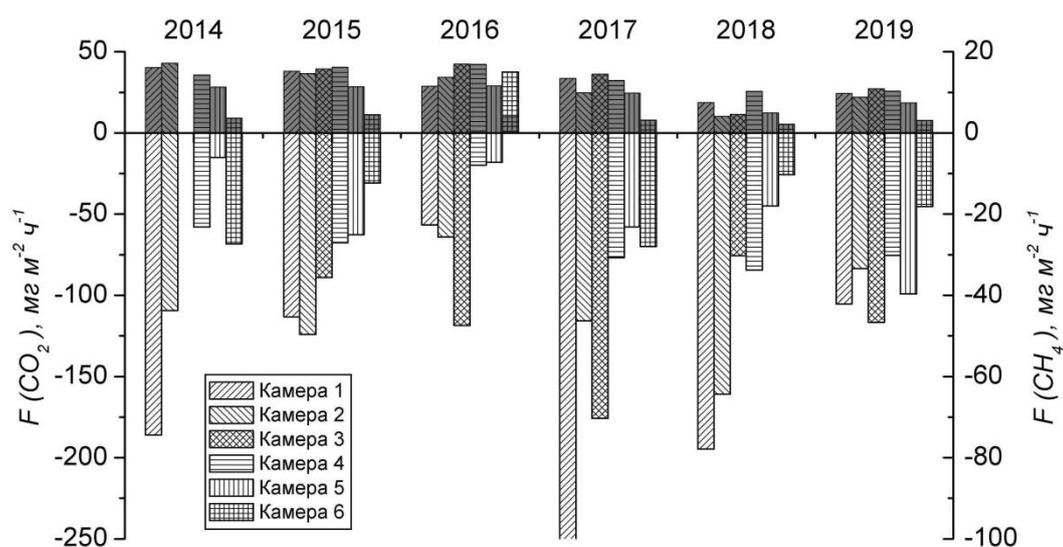


Рис. 3. Среднесезонные (июнь-сентябрь) потоки CO_2 (белый цвет) и CH_4 (темно-серый) на границе болотная почва – атмосфера на Бакчарском болоте в 2014–2019 гг.

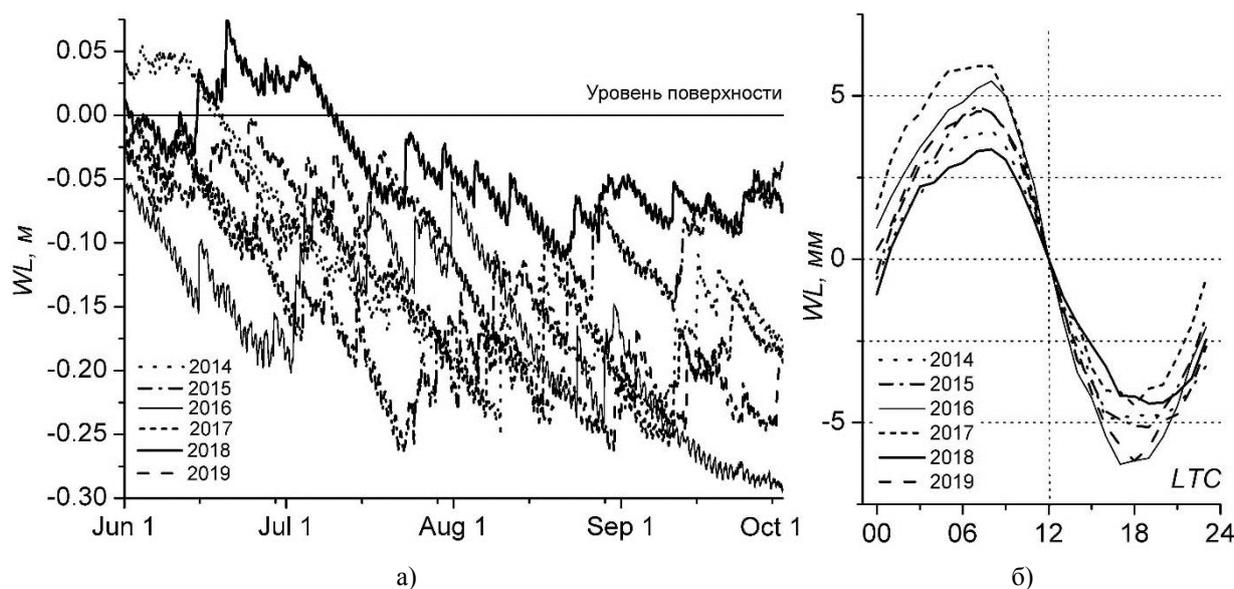


Рис. 4. Многолетний сезонный и суточный ход уровня почвенных вод на Бакчарском болоте в 2014–2019 гг.

Таблица 2

Корреляционный анализ данных и среднесезонные значения по увлажнению болотной топи в 2014–2019 гг.

Годы	2015	2016	2017	2018	2019	<i>WL</i> сред., м	<i>WL</i> min	<i>WL</i> max	$T_{130\text{ см}}$ сп., °C
2014	0,570	0,369	0,872	0,688	0,698	-0,125±0,083	-0,252	0,054	+6,21
2015	1	-0,26	0,286	0,199	-0,06	-0,120±0,059	-0,261	-0,002	+6,88
2016		1	0,519	0,481	0,752	-0,166±0,068	-0,298	-0,052	+6,42
2017			1	0,690	0,771	-0,141±0,062	-0,263	-0,018	+6,92
2018				1	0,803	-0,038±0,042	-0,114	0,075	+5,96
2019					1	-0,132±0,083	-0,264	-0,004	+6,40

Стоит отметить наличие устойчивого суточного хода у *WL* (рис. 4б), определяемого дневным испарением из торфяной залежи и ночной адвекцией вод по всей площади болота [8]. Для наблюдавшегося в 2016 году спада поглощения CO_2 в болотных экосистемах было зафиксировано повышенное испарение почвенной влаги по сравнению с другими сезонами (рис. 4б).

Зафиксированное межгодное поведение потоков метана в исследуемой экосистеме показывало достаточно стабильные величины эмиссии CH_4 в 2014–2017 гг., причем суммарная продуктивность метаногенеза в открытой топи (камеры 1–5) оказалась значительно выше по сравнению с комплексом низкого яма (камера 6). Однако, в сезоне 2018 г. значения эмиссии CH_4 показали почти повсеместное падение в 1,5–2 раза (рис. 3).

Причины такого критического изменения в газообмене на болотной поверхности были связаны с наблюдавшимися аномальными количествами осадков и высокими значениями *WL* в период выхода процессов метаногенеза на сезонный максимум в конце июня начале июля 2018 г. (рис. 4а). Приток избыточной атмосферной влаги мог вызвать вымывание и вынос за пределы болота питательного субстрата необходимого для жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов, а также нарушить баланс биохимических процессов отвечающих за окисление CH_4 в болотных экосистемах [9]. Суточный ход *WL* в 2018 году показал наименьшую амплитуду колебаний (рис. 4б).

Влияние погодной аномалии 2018 г. на газообмен в болотных экосистемах подробно рассматривается в работе [10].

Заключение

Многолетнее использование автоматизированного камерного метода показала эффективность его применения для исследований поведения газовых потоков на болотной поверхности во временном и пространственном масштабах.

Интегральные значения потоков CO_2 за весь период измерений показывают, что поверхности западносибирских болот являются мощным «поглотителем» атмосферного углерода. При этом, величины эмиссии CH_4 из различных участков болотных почв зависят от типа растительности, уровня увлажнения и прогрева торфяной залежи. Наибольшие величины болотной эмиссии CH_4 наблюдаются в июле и достигают довольно больших величин в открытой топи ($\sim 15 \text{ мг} \times \text{м}^{-2} \times \text{час}^{-1}$). Наименьшими значениями эмиссии CH_4 характеризовался низкий рям ($2\text{--}3 \text{ мг} \times \text{м}^{-2} \times \text{час}^{-1}$).

Отмечено значительное снижение показателей эмиссии CH_4 с болотной поверхности почти на всех измерительных участках в 2018 г. Это увязывается с наблюдавшимися погодными аномалиями в период выхода процессов метаногенеза на максимальные сезонные показатели.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-45-700020 р_а. Обеспечение полевых измерений осуществлялось при участии Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pavelka M., et al. Standardisation of chamber technique for CO_2 , N_2O and CH_4 fluxes measurements from terrestrial ecosystems // Int. Agrophys., 2018, V. 32, P. 569–587. DOI: 10.1515/intag-2017-0045.
2. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd>
3. Ciais P., et al. Carbon and other biogeochemical cycles // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 570 pp.
4. Korkiakoski M., et al. Methane exchange at the peatland forest floor – automatic chamber system exposes the dynamics of small fluxes // Biogeosciences, 2017, V. 14, P. 1947–1967.
5. Краснов О.А., и др. Автоматизированный комплекс «Flux-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1090–1097.
6. Suto H., Inoue G. A new portable instrument for in situ measurement of atmospheric methane mole fraction by applying an improved tin dioxide-base gas sensor // J. Atmos. Ocean. Technol. 2010. V. 27. P. 1175–1184.
7. Maksyutov S., et al. Methane fluxes from wetland in West Siberia during April–October 1998 // Proc. Seventh Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu, 1999. P. 115–124.
8. Eppinga M.B., et al. Regular surface patterning of peatlands: Confronting theory with field data // Ecosystems. 2008. V. 11, P. 520–536. DOI: 10.1007/s10021-008-9138-z.
9. Каложный И.Л. Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России // Метеорол. и гидрол. 2018. № 8. С. 72–81.
10. Дьячкова А.В., и др. Влияние аномальных факторов среды на эмиссию метана на Бакчарском болоте в районе п. Плотниково летом 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 482–489.

Донченко В.К.

**Экологическая безопасность – ключевая проблема
глобальной экодинамики**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,
Корпусная ул., д. 18, г. Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: donvk2020@mail.ru

Академик Кирилл Яковлевич Кондратьев оставил уникальное научное наследие в различных областях знаний. В представленном сообщении проводится краткий анализ его научной деятельности по созданию нового междисциплинарного направления – «Глобальная экодинамика». Экологической безопасности он уделял ведущую роль в проблематике нового научного направления. Научные идеи и результаты исследований академика К.Я. Кондратьева вошли в Стратегию экологической безопасности Российской Федерации.

Ключевые слова: юбилей академика К.Я. Кондратьева, управление окружающей средой, глобальная экодинамика, проблемы глобальной безопасности, загрязнение окружающей среды уязвимость земной цивилизации, ядерная зима, проект Геи, теория биотической регуляции.

Vladislav K. Donchenko

Environmental safety is a key issue in global EcoDynamics

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences,
18, Korpusnaya st., St. Petersburg, 197110, Russia
E-mail: donvk2020@mail.ru

Academician Kirill Kondratyev left a unique legacy to science in various fields of knowledge. This report provides a brief analysis of his research activities to create a new interdisciplinary scientific field – «Global EcoDynamics». He assigned a leading role to environmental safety in solving the problems of a new scientific direction. It is important to note that the scientific ideas and research results of academician K.Y. Kondratyev on solving the problems of global EcoDynamics were included in the environmental security Strategy of the Russian Federation. **Keywords:** anniversary of academician K.Y. Kondratyev, environmental management, environmental pollution, global EcoDynamics, problems of the global safety, vulnerability of the human's civilization, nuclear winter, Gaia project, biotic regulation theory, environmental security Strategy.

Введение

Никто не мог предположить, что столетний юбилей выдающегося ученого Кирилла Яковлевича Кондратьева совпадет с глобальным экологическим и социально-экономическим кризисом, спровоцированным пандемией коронавируса COVID-19.

Именно сейчас мы осознали, как нам его не хватает. Его знаний, творческой энергии и уникальной способности научного предвидения.

С конца семидесятых годов прошлого века он активно работал над раскрытием проблем глобальной безопасности. В его разносторонней научной деятельности особый научный интерес в то время представляла проблема уязвимости человечества в результате негативных природных и антропогенных возмущающих воздействий.

Разработку данной проблемы он проводил с использованием аэрокосмических исследований, по результатам которых он показал, что антропогенные негативные воздействия в результате хозяйственной и иной человеческой деятельности сопоставимы по своим масштабам с природными опасными процессами.

Управление окружающей средой

Кирилл Яковлевич очень принципиально относился к научным понятиям. Так, например, понятие «управление окружающей средой», которое было введено в 1972 г. на первой международной конференции ООН по окружающей среде в Стокгольме и закреплено на Всемирном Форуме по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро в его представлениях не совсем правильно отражало сущность происходящих процессов. По его мнению, мы не можем управлять окружающей средой, однако мы можем, используя научные достижения обеспечить более полное и надежное слежение за различными природными и антропогенными процессами, оказывающими негативное воздействиями на жизненную среду нашей планеты. Полученные знания и технические возможности обеспечивают функционирование институтов прогнозирования опасных природных и антропогенных процессов, что позволяет разрабатывать и принимать адекватные превентивные меры. Оценка эффективности их применения в реальных событиях дает нам опыт для более уверенных действий в будущем.

Кирилл Яковлевич высоко ценил исследования, которые проводились под эгидой Римского клуба. Со многими авторами он был лично знаком и встречался на различных научных форумах. Неоднократно это проходило в международном институте прикладного системного анализа (МИПСА), International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

Атмосфера международного и междисциплинарного сотрудничества, которая была характерна для МИПСА, способствовала установлению международных научных контактов. В своих выступлениях, а особенно, в научных дискуссиях, академик К.Я. Кондратьев поражал участников широтой и глубиной знаний по рассматриваемым проблемам. Отмечалась также его принципиальность в оценке достигнутых результатов. В частности, по конкретным докладом Римского клуба [1] он показывал их недостаточную достоверность, что впоследствии и подтвердилось [2, 3].

Проблема ядерной зимы

Принципиальным отличием исследований в области глобальной безопасности Кирилл Яковлевич считал соблюдение условия институционального закрепления полученных результатов на национальном и международном уровнях. Он не поддерживал алармизм, который в семидесятые – девяностые годы прошлого века имел место в исследованиях посвященных антропогенным загрязнениям окружающей среды. В то же время, он внимательно следил за подготовкой планов проектов, реализация которых была связана с негативным воздействием на окружающую среду и здоровье населения. Он вместе с академиком Никитой Николаевичем Моисеевым принимал участие в программе «Ядерная зима». Результаты математического моделирования международной команды ученых, подхваченные в информационном пространстве журналистами и общественными деятелями, смогли оказать интеллектуальное воздействие на политическое руководство ядерных держав, - ящик Пандоры ядерной войны тогда закрылся... На уровне ООН были приняты основополагающие документы, которые определили правовое поле международной ядерной безопасности [4]. Необходимость соблюдения принципов, а, главное, практических действий, направленных на соблюдение «ядерного паритета», обусловила актуальность ускоренного развития исследований и практического применения аэрокосмических методов и систем дистанционного контроля событий, связанных с незаконным испытанием ядерного оружия. Тогда это было реализовано, что подтверждалось успехами СССР в освоении космоса. Созданные тогда методы и системы дистанционного зондирования впоследствии нашли свое применение для дистанционного контроля опасных событий на атомных электростанциях и других опасных объектах.

Проблема уязвимости земной цивилизации

В проблеме уязвимости современной человеческой цивилизации его интересовали экологические, демографические, экономические, политические, военные, гуманитарные и социальные аспекты проявления риска возникновения угроз безопасности, реализация которых может превышать опасный порог уязвимости и негативно воздействовать на выживание человечества.

В своих научных трудах и в выступлениях он отмечал, что при взаимодействиях в глобальной системе «Природа – общество» возникают опасные процессы, по которым достоверные знания еще отсутствуют и поэтому они не имеют пока достаточно четких и согласованных определений. Он считал, что для мирового сообщества в контексте устойчивого развития принципиально важным является разработка определения понятия глобальной (международной) безопасности.

(Сейчас в условиях пандемии коронавируса COVID-19 мы снова подошли к необходимости разработки этого понятия).

Это определение должно было включать инициирующее начало для современной цивилизации в подготовке и проведении совместных акций, направленных на предотвращение различных угроз безопасности и развитие международного сотрудничества.

Проект Гея

Хозяйственное освоение биосферы способствовало формированию и развитию глобальной техносферы. В двадцатом веке она стала по своим масштабам сопоставима с биосферой. Однако процессы обеспечивающие развитие техносферы не сопоставимы с совершенными, взаимосвязанными и сложными естественными процессами, обеспечивающими устойчивость биосферы. Уникальная точность поддержания мощных потоков синтеза и разложения органического вещества позволяет биоте компенсировать геофизические и космические флуктуации, возвращая окружающую среду к первоначальному состоянию не более чем за десятки лет.

В прошлом году (26 июля) отмечался 100-летний юбилей британского ученого климатолога Джеймса Лавлока (James Lovelock). А ровно 50 лет назад он впервые представил гипотезу «Гея» (Gaia hypothesis), согласно которой наша планета представляет собой единый суперорганизм, в котором взаимодействуют компоненты «живой» и «неживой природы», образуя глобальную экосистему [5]. Взаимодействие компонентов «живой» и «неживой природы» способно обеспечить климатический гомеостаз и поддерживать жизнь на нашей планете в чрезвычайно узких пределах изменений состояния окружающей среды. Изменения этих условий за геологические периоды времени порядка миллионов лет каким-то образом контролируются живыми организмами. Ключевым аспектом гипотезы было положение о том, что планета, как живой организм, имеет фундаментальное свойство самостоятельно поддерживать климатический гомеостаз. Однако никаких механизмов биотической регуляции окружающей среды в рамках этой гипотезы сформулировано не было.

В то же время проект Гея был очень хорошо, а главное доступно представлен широкой общественности. Кратко, суть этих представлений можно изложить так: «Наша планета – Гея – живое существо. Она, как любой живой организм, может быть здоровой и больной. Сейчас она больна. И виноваты в этом мы – человечество. Давайте сделаем все от нас зависящее, чтобы изменить этот мир». Эти простые и понятные мысли возбудили очень хороший общественный резонанс во всем мире. Они инициировали общественно-политические акции, направленные на защиту окружающей среды и устойчивое развитие. К проекту Гея Кирилл Яковлевич относился не однозначно, он считал, что по своей сути гипотеза Гея представляла собой гуманистическую идею, яркий образ, но не теорию.

Теория биотической регуляции устойчивости биосферы

Устойчивость биосферы Кирилл Яковлевич определял как основу глобальной **экологической безопасности**. За поддержание устойчивости биосферы ответственны процессы биотической регуляции. Он очень высоко ценил и постоянно поддерживал исследования профессора Виктора Георгиевича Горшкова направленные на разработку теории биотической регуляции устойчивости биосферы. В этих исследованиях были показаны возможные последствия от возмущающих воздействий техносферы на биосферу. Причем продолжающееся уменьшение биологического разнообразия считалось главным фактором возмущающего воздействия.

Теория биотической регуляции развивает учение об устойчивости окружающей среды [6]. Главным принципом в данном учении является принцип Ле Шателье, действующим в невозмущенной биоте. В соответствии с данным принципом все случайные геофизические и космические возмущения окружающей среды компенсируются путем соответствующих изменений функционирования естественной биоты. Благодаря этому поддерживаются постоянными средние значения параметров окружающей среды и ограничиваются флуктуации относительно этих средних значений. Нарушения принципа Ле Шателье неизбежно должны приводить к негативным изменениям состояния окружающей среды. За время эволюции нашей планеты принцип Ле Шателье нарушался неоднократно, что приводило к глобальным катастрофам, после которых биосфера в течение многих тысяч лет приходила в новое состояние климатического гомеостаза.

Проблема глобальной безопасности

- В проблеме глобальной безопасности Кирилл Яковлевич выделил три ключевых аспекта, раскрытие которых имеет особую актуальность и в настоящее время. К ним относятся:
- возмущающие воздействия, которые являются объектом регулирования, ограничения и контроля;

- последствия возмущающих воздействий, исключение которых требует применения различных стратегий приспособления для обеспечения устойчивого развития;
- реагирование на происходящие изменения с целью снижения возмущающих воздействий и обеспечения глобальной безопасности.

К числу важнейших возмущающих воздействий, которые провоцируют усиление социально-экономической напряженности, он относил загрязнение окружающей среды, изменение климата, рост численности населения, нищету, неграмотность, голод, детскую смертность, концентрацию населения в городах, безработицу [7].

Загрязнение окружающей среды он относил к ключевым факторам негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и здоровье населения. Именно загрязнение: физическое, химическое, биологическое (включая вирусологическое), радиационное, представляет собой угрозу экологической безопасности. К основным источникам загрязнения окружающей среды относятся промышленное производство, транспорт, энергетика, сельское и коммунальное хозяйство.

Безусловно, возмущающие воздействия на биосферу, которые возникают в результате осуществления различных актов хозяйственной и иной деятельности, не могут, как в случае реализации ядерной угрозы, привести к быстрой гибели цивилизации. Они действуют постепенно, при этом возникают процессы, нарушающие биотическую регуляцию биосферы от локального до глобального уровней.

Заключение

В созданной и развивающейся международной институциональной системе глобальной экологической безопасности определяющее значение имеет поиск путей более эффективного использования существующих соглашений, программ и институтов. Для успешного функционирования данной системы необходимо расширение и углубления международного сотрудничества в экологической сфере.

В представлениях Кирилл Яковлевича экологическая безопасность институционально должна входить в структуру общей безопасности. Сейчас это ни у кого не вызывает сомнений, но двадцать лет назад это очевидное положение было предметом многочисленных споров. Это научное положение, которое было обосновано в трудах и в выступлениях академика Кирилл Яковлевича Кондратьева институционально закреплено в «Стратегии экологической безопасности Российской Федерации до 2025 года», которая была утверждена Указом Президента РФ от 19.04.2017 № 176.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс Й. Пределы роста. - /Пер. с англ./М.: Прогресс-Пангея, 1994. – 314 с.
2. Медоуз Д.Л. За пределами роста // Вестн. МГУ. Сер. 12. Политические науки. 1995. № 5. С. 80–86.
3. Медоуз Д., Рандерс Й. Пределы роста: 30 лет спустя. /Пер. с англ./М.: Академкнига, 2007. 342 с.
4. Моисеев Н.Н. Человек и ноосфера. М.: Молодая гвардия, 1990, 351 с.
5. James Lovelock/ Gaia: A New Look at Life on Earth Oxford University Press, 2016, P. 148.
6. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995, 470 с.
7. Кондратьев К.Я. Современное общество потребления: экологические ограничения. В сб. трудов Санкт-Петербургского научно-исследовательского Центра экологической безопасности Российской академии наук «Методологические проблемы экологической безопасности», 2008. С. 8–39.

Коваль А.В.^{1*}, Гаврилов Н.М.¹, Погорельцев А.И.^{1,2}, Шевчук Н.О.¹

Моделирование чувствительности общей циркуляции атмосферы к изменению солнечной активности в термосфере

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, дом 7–9

*E-mail: a.v.koval@spbu.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный гидрометеорологический университет»

Россия, 192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, дом 79

С использованием численной модели проведено исследование чувствительности общей циркуляции атмосферы к изменениям солнечной активности (СА) в термосфере. В исследовании используется модель средней и верхней атмосферы МСВА. Для достижения достаточной статистической достоверности глобальная циркуляция атмосферы моделируется на основе двух ансамблей из 16 прогонов модели, учитывающих низкую и высокую СА выше 100 км. Показано, что колебания СА способствуют изменению среднего зонального ветра и температуры в средней атмосфере до 10%. Наиболее интересный вывод состоит в том, что воздействие изменений СА на термосферу выше 100 км может значительно влиять на динамический и тепловой режимы на высотах ниже 100 км, за счет изменения волноводных свойств атмосферы. Эти результаты моделирования важны для дальнейшего понимания механизмов воздействия СА на динамику средней атмосферы.

Ключевые слова: общая циркуляция, планетарные волны, численное моделирование, солнечная активность.

**Andrey V. Koval^{1*}, Nikolai M. Gavrilov¹, Alexander I. Pogoreltsev^{1,2},
Nikita O. Shevchuk¹**

Modelling of the sensitivity of general atmospheric circulation to solar activity changes in the thermosphere

¹Saint-Petersburg State University
Russia, 199034, Saint Petersburg, Universitetskaya emb. 7–9

* E-mail: a.v.koval@spbu.ru

²Russian State Hydrometeorological University

Russia, 192007, Saint-Petersburg, Voronezhskaya ulitsa, 79

Using a numerical model, a study of the sensitivity of the general atmospheric circulation to changes in solar activity (SA) in the thermosphere was performed. The study uses a model of the middle and upper atmosphere MUAM. To achieve sufficient statistical confidence, the global atmospheric circulation is simulated on the basis of two ensembles of 16 model runs, taking into account low and high SA above 100 km. It is shown that SA fluctuations contribute to a change in the mean zonal wind and temperature in the middle atmosphere up to 10%. The most interesting conclusion is that the effect of changes in SA in the thermosphere above 100 km can significantly affect the dynamic and thermal regime at altitudes below 100 km, due to changes in the waveguide features of the atmosphere. These simulation results are important for further understanding the mechanisms of the influence of SA on the dynamics of the middle atmosphere.

Keywords: general circulation, planetary waves, numerical simulation, solar activity.

Введение

Солнечная активность (СА) испытывает циклические колебания с периодом около 11 лет [1], что влияет на тепловые и динамические характеристики циркуляции атмосферы. Прежде всего, это приводит к значительным изменениям в распространении планетарных волн (ПВ) в разных слоях атмосферы [2]. При этом, крупномасштабные атмосферные волны играют существенную роль в динамике средней и

верхней атмосферы, способствуя переносу энергии и импульса [3]. Значительные изменения активности ПВ были выявлены при анализе реакции среднегодовой температуры и ее сезонных колебаний на солнечный 11-летний цикл [4]. Также на циркуляцию атмосферы может влиять частичное отражение ПВ, распространяющихся из тропосферы на высотах нижней термосферы [5].

Нелинейная численная механистическая модель средней и верхней атмосферы (МСВА) была расширена для моделирования общей циркуляции и распространения ПВ на высотах от тропосферы до 300 км [6]. Моделирование с помощью МСВА выявило существенные изменения общей циркуляции и ПВ на высотах выше 100 км из-за вариаций СА [7, 8]. В данном исследовании мы расширили количество прогонов МСВА и получили статистически достоверные результаты, показывающие существенную реакцию динамики стратосферы и мезосферы на изменения СА на высотах выше 100 км. Моделирование с помощью МСВА проводилось на высотах 0–300 км, при этом разные уровни СА задавались в модели на высотах выше 100 км. С помощью такого подхода мы избегаем прямого воздействия солнечной радиации на среднюю атмосферу и, следовательно, выявляем эффекты, связанные с возможной динамической связью термосферы и средней атмосферы посредством взаимодействий ПВ со средним потоком.

Методология и численное моделирование

Для изучения изменений глобальной циркуляции средней атмосферы были проведены численные расчеты с использованием нелинейной механистической модели МСВА [6]. Эта модель разработана на основе конечно-разностной модели Института метеорологии средней атмосферы Лейпцига (СОММА-LIM), описанной в [9]. В модели МСВА решается система стандартных гидродинамических уравнений в сферических координатах. Сетка модели имеет $36 \times 64 \times 56$ узлов вдоль широты, долготы и по высоте, соответственно. Ключевые характеристики и физические процессы, учитываемые в модели, описаны в [6, 7].

В качестве входного параметра для индикации различных уровней СА в радиационном блоке МСВА используется поток солнечного излучения с длиной волны 10,7 см (F10.7). Поток F10.7 циклически изменяется с периодами около 11 лет. Эти изменения коррелируют с изменениями числа Вольфа, поэтому поток F10.7 является основной характеристикой СА. На основании измерений шести последних солнечных циклов были выбраны значения $F_{10.7} = 220, 130, 70$ sfu, соответствующих высокому, среднему и низкому уровням СА соответственно ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Вт} / (\text{м}^2\text{Гц})$). Поскольку основной целью данного исследования является изучение термосферных эффектов вариаций СА, минимальные и максимальные значения F10.7 были определены на высотах выше 100 км. Для учета воздействия ионизированных компонент на движение нейтрального газа для различных уровней СА, в МСВА учтены ионосферные проводимости, и их временные и пространственные неоднородности [7].

Для анализа и интерпретации моделируемой атмосферной циркуляции, был рассчитан поток Элиассена-Пальма (ЭП-поток) для ПВ и его дивергенция, которая определяет ускорение среднезонального зонального потока, производимого за счет воздействия атмосферных ПВ [10]. Для достижения достаточной статистической достоверности было выполнено 16 пар прогонов модели для низкой и высокой СА с использованием подхода, описанного в [8].

Результаты моделирования

С целью исследования влияния изменений СА в термосфере на циркуляцию в средней атмосфере, мы проанализировали наборы из 921600 пар значений смоделированных атмосферных параметров (зональный ветер и температура) за период с середины декабря по конец февраля, соответствующих низкому и высокому уровням СА (извлеченных из 16 прогонов модели * 900 значений по времени, соответствующих 2-х часовому выводу * 64 узла по долготе). Помимо повышения статистической достоверности, этот подход позволил нам «сгладить» влияние таких крупномасштабных динамических возмущений, как, например, события внезапных стратосферных потеплений, возникающие в отдельных прогонах модели.

Левые панели на рис. 1а, б представляют, соответственно, широтно-высотные распределения среднего зонального ветра и температуры на высотах 0–100 км, осредненные по временному интервалу с середины декабря по конец февраля, и по 16 прогонам МСВА при высокой СА. Полученные распределения соответствуют полуэмпирическим моделям температуры [11] и зонального ветра [12]. Правые панели на рисунках 1а, б отражают соответствующие различия между высоким и низким значениями СА в термосфере. Средние приращения зонального ветра и температуры в средней атмосфере из-за изменения СА выше 100 км могут достигать 3–4 м/с и 3 К. На высотах 40–100 км средние перепады температур имеют

максимальные значения в высоких и средних широтах северного полушария в правой части рисунка 1б. Оценка статистической достоверности различий, показанных на правых панелях рисунка 1, была проведена на основе парного критерия Стьюдента, как это было описано Ковалем в работе [8]. На уровне значимости $\alpha = 5\%$ средние различия в температуре и зональном ветре удовлетворяют гипотезе их ненулевых значений во всех точках сетки.

Изучению изменений среднего зонального ветра и температуры в средней атмосфере из-за изменений СА посвящено много работ. Например, анализ коэффициентов регрессии между СА и средней температурой и зональным ветром в зимние месяцы на основе данных атмосферного реанализа ERA-Interim показал заметные изменения в этих полях на высотах до 60 км [13]. В частности, был продемонстрирован существенный нагрев в тропической и охлаждение во внетропической стратосфере в условиях максимума СА по данным ERA-40. В работе [14] проведено численное моделирование для оценки влияния солнечного излучения на общую атмосферную циркуляцию с использованием химико-климатической модели SOCOL. Результаты, полученные для северных зимних условий, в целом согласуются с описанными выше результатами.

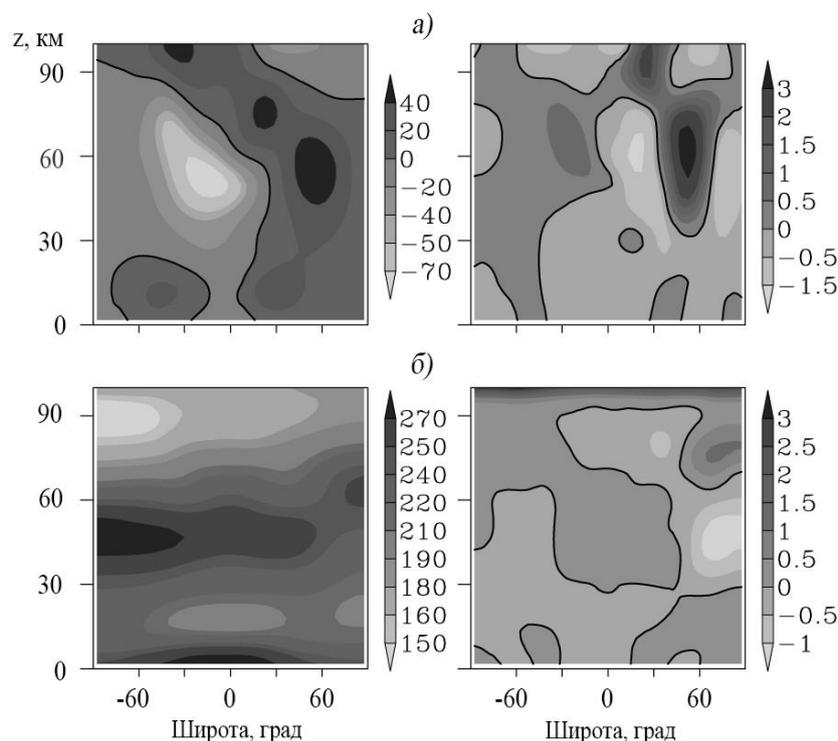


Рис. 1. Высотно-широтные распределения среднего зонального потока в м/с (а, слева) и температуры в К (б, слева) при высокой СА, а также их различия при низкой СА (правые панели), осредненные за временной отрезок с середины декабря по февраль и по 16 прогонам МСВА. Сплошные линии соответствуют нулевым уровням

Чтобы понять причины различий зонального ветра и температуры в средней атмосфере из-за термосферного воздействия СА в, мы проанализировали различные слагаемые в уравнениях движения и теплового баланса МСВА на высотах ниже 100 км. Основные различия были обнаружены в притоках тепла, вызванных горизонтальной адвекцией тепла и неадиабатическим нагревом/охлаждением из-за вертикальных движений воздуха в высоких северных широтах. Такие различия в нагреве и охлаждении могут быть вызваны взаимодействиями между средним потоком и ПВ, распространяющимися из нижних слоев атмосферы [15]. На рисунке 2 представлена вертикальная компонента ЭП-потока для стационарной ПВ с зональным волновым числом 1 и дивергенция потока ЭП-потока, рассчитанные для зимних месяцев. Левая и правая панели на рисунке 2 представляют обсуждаемые величины при высоком уровне СА и соответствующие различия между высокой и низкой СА.

Согласно классической теории атмосферных ПВ [10], направленный вверх ЭП-поток соответствует волновому потоку тепла, направленному на север. Он способствует потеплению средней атмосферы в высоких широтах. На правой панели рисунка 2а в высоких северных широтах показаны

отрицательные приращения ЭП-потока на высотах 30–60 км и положительные – выше 60 км, что соответствует отрицательным и положительным температурным различиям в соответствующих атмосферных слоях на правой панели на рисунке 1б. Такие нагрев и охлаждение средней атмосферы высоких широт могут изменять меридиональные температурные градиенты и приводить к изменениям зонального ветра в соответствующих слоях атмосферы. Дополнительное воздействие на циркуляцию могут оказывать ускорения зонального ветра, создаваемые в стратосфере при диссипации и/или нестационарности ПВ: на правой панели рисунка 2б показаны различия в дивергенции ЭП-потока: их максимумы находятся на высотах 40–100 км в средних и высоких северных широтах, где на правой панели рисунка 1а показаны наиболее существенные изменения зонального ветра.

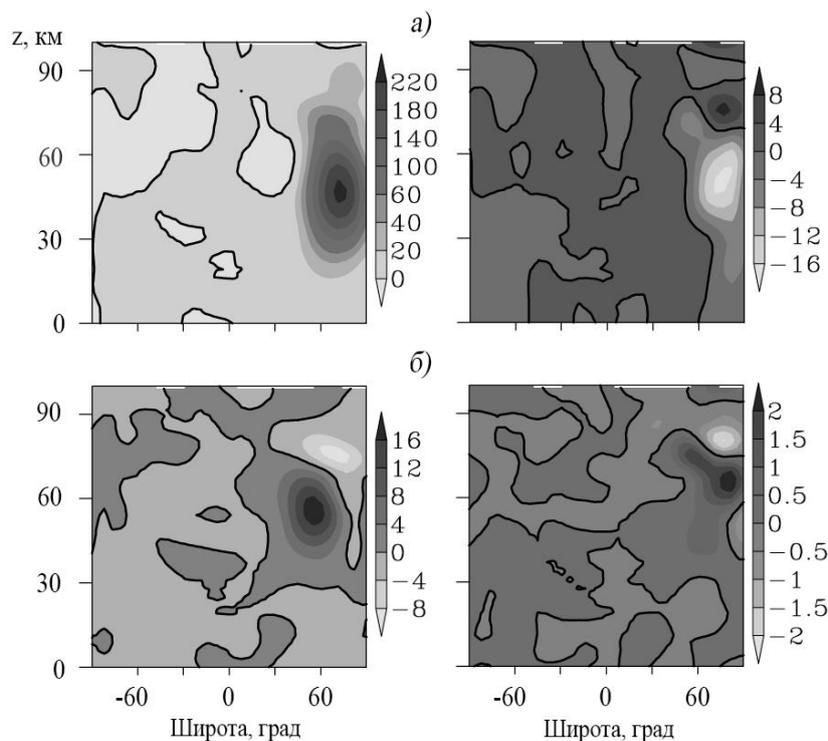


Рис. 2. Вертикальная компонента ЭП-потока в $10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}^2$ (а, слева) и дивергенция ЭП-потока в $\text{м}/\text{с}/\text{сут}$ (б, слева) для высокой СА и их приращения за счет изменения СА (справа), усредненные за временной отрезок с середины декабря по февраль и по 16 прогнозам МСВА. Сплошные линии соответствуют нулевым уровням

Изменения среднего ветра и температуры, вызванные солнечным воздействием в условиях разной СА, могут изменять условия распространения ПВ в атмосфере, влияющих на общую циркуляцию [7]. С другой стороны, изменения в компонентах ЭП-потока для ПВ могут вызывать волновые ускорения и притоки тепла, приводящие к изменениям средней атмосферной циркуляции и температуры. Следовательно, взаимодействие между циркуляцией в средней атмосфере и ПВ не является стационарным процессом, а вызывает так называемые аperiодические колебания, «васцилляции», имеющие периоды до нескольких недель [16]. Результаты моделирования МСВА также содержат такие колебания, следовательно, рассмотренные выше характеристики средней циркуляции и ПВ отражают кумулятивные эффекты этих колебаний, усредненных за зимний сезон.

Приращения зонального ветра и температуры на правых панелях рисунка 1 сильнее в северном (зимнем) полушарии. Это связано в первую очередь с тем, что зональный ветер в стратосфере летнего полушария направлен на запад, что предотвращает прямое распространение ПВ из нижней атмосферы [17]. Соответствующие распределения амплитуд стационарных ПВ для зимнего периода в северном полушарии представлены на рис. 1 и 3 из [8]. Это подтверждает, что изменения условий распространения ПВ на высотах термосферы могут изменять условия взаимодействия между средним потоком и волнами, воздействуя на тепловой режим и общую циркуляцию в средней атмосфере в зимний период.

Заклучение

Основное внимание в этой статье уделено изучению чувствительности общей циркуляции средней атмосферы к изменению солнечного воздействия в рамках цикла СА на основе численного моделирования. Модельные данные об атмосферной циркуляции получены путем обработки ансамблей из 16 прогонов с использованием трехмерной механистической модели общей циркуляции МСВА для низкой и высокой СА.

Изменения скорости зонального ветра и температуры могут достигать 10% на высотах 40–100 км в высоких и средних широтах северного полушария. Основные различия были обнаружены в слагаемых в уравнении теплового баланса МСВА, содержащих притоки тепла за счет горизонтальной адвекции и неадиабатического нагрева/охлаждения посредством вертикальных движений воздуха в высоких северных широтах. Получены значительные колебания вертикальной компоненты потока Элиассена-Пальма на высотах 40–100 км, которые связаны с повышениями и понижениями температуры в высоких северных широтах при высоком уровне СА. Результаты моделирования дают статистически достоверные подтверждения существующих представлений о том, что изменения в термосфере, вызванные цикличностью СА, могут влиять на условия распространения и отражения ПВ, вызывающих заметные динамические и тепловые изменения в средней атмосфере.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных исследований: моделирование общей циркуляции и расчет ПВ – грант №20-05-00450; анализ и интерпретация общей циркуляции и потоков Элиассена-Пальма – грант №18-05-01050.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986, 296 с.
2. Arnold, N. F., & Robinson, T. R. Solar cycle changes to planetary wave propagation and their influence on the middle atmosphere circulation // *Ann. Geophysicae*, 1998, 16(1), 69–76.
3. Holton, J. R. The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere. *Meteorol. Monogr.* 15(37), 1975, 218 p.
4. Gan, Q., Du, J., Fomichev, V. I., Ward, W. E., et al. Temperature responses to the 11 year solar cycle in the mesosphere from the 31year (1979–2010) extended Canadian Middle Atmosphere Model simulations and a comparison with the 14year (2002–2015) TIMED/SABER observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 2017, 122(4), 4801–4818.
5. Lu, H., Scaife, A. A., Marshall, G. J., Turner, J., Gray, L. J. Downward wave reflection as a mechanism for the stratosphere-troposphere response to the 11-year solar cycle // *J. Clim.*, 2017, 30(N), 2395–2414. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0400.1
6. Pogoreltsev, A. I., Vlasov, A. A., Fröhlich, K., Jacobi, Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, 69, 2083–2101.
7. Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Shevchuk N.O., Influence of solar activity on penetration of traveling planetary-scale waves from the troposphere into the thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(8). 6888–6903.
8. Коваль А.В. Статистически значимые оценки влияния солнечной активности на планетарные волны в средней атмосфере Северного полушария по данным модели МСВА // *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 64–72.
9. Fröhlich, K., Pogoreltsev, A., Jacobi, Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model // *Advances in Space Research*, 2003, 32, 863–868.
10. Andrews, D.G., Holton, J.R., Leovy, C.B. Middle atmosphere dynamics. New York: Acad. Press. 1987, 489 p.
11. Picone, J.M., Hedin, A.E., Drob, D.P., Aikin, A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, 107(A12), 1468.
12. Jacobi, Ch., Fröhlich, K., Portnyagin, Y. Semi-empirical model of middle atmosphere wind from the ground to the lower thermosphere // *Adv. Space Res.* 2009, 43, 239–246.
13. Crooks, S.A., & Gray, L.G. Characterization of the 11-Year Solar Signal Using a Multiple Regression Analysis of the ERA-40 Dataset // *Journal of climate*, 2005, 18, 996–1015.
14. Rozanov, E., Egorova, T., & Schmutz, W. Response of the earth's atmosphere to the solar irradiance variability // *Advances in Global Change Research*, 2008, 33, 317–331.

15. Koval, A.V., Gavrilov, N.M., Pogoreltsev, A.I., & Shevchuk, N.O. (2019). Reactions of the middle atmosphere circulation and stationary planetary waves on the solar activity effects in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 10645-10658
16. Holton, J.R., & Mass, C. Stratospheric vacillation cycles // *J. Atmos. Sci.* 1976, 33, 2218–2215.
17. Charney, J.G., & Drazin, P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(1), 83–109.

Кондрик Д.В.* , Чепикова С.С.

Спутниковые исследования, моделирование и прогноз цветений кокколитофор в Мировом океане

Научный фонд "МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЦЕНТР ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ И ДИСТАНЦИОННОМУ
ЗОНДИРОВАНИЮ имени НАНСЕНА" (Фонд «Нансен-центр»)
Россия, 199034, Санкт-Петербург, 14-я Линия В.О., дом 7,
Бизнес-центр «Преображенский», офис 49
*E-mail: dmitry.kondrik@niersc.spb.ru

Настоящая работа представляет собой комплексное двадцатилетнее спутниковое исследование. В ходе работы изучались внутри- и межгодовые (1998–2018 гг.) пространственно-временные вариации (*i*) интенсивности и площади/локализации цветений *E. huxleyi* в субарктических и арктических морях: Северном, Гренландском, Лабрадорском, Норвежском, Баренцевом и Беринговом, (*ii*) общее содержание неорганического углерода в зонах цветения и (*iii*) влияние цветений этой водоросли, как на парциальное давление CO₂ в поверхностном слое исследуемых морских акваторий, так и на содержание атмосферного CO₂ в зоне цветения. Выполнен анализ влияющих физических факторов среды на формирование и развитие цветений кокколитофор и выявлены их оптимальные значения. С помощью методов машинного обучения были построены модели, оценивающие области развития цветений кокколитофор в полярных и субполярных морях Мирового океана и позволяющие моделировать и прогнозировать развитие цветений на основе спутниковых данных значений физических факторов среды.

Ключевые слова: спутниковое дистанционное зондирование; *Emiliana huxleyi*; машинное обучение; цветения фитопланктона; кокколитофоры.

Dmitry V. Kondrik* , Svetlana S. Chepikova

Satellite studies, modeling and forecast of coccolithophore blooms in the World Ocean

Scientific Foundation "Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre"
(Nansen Centre, NIERSC)
Russia, 199034, Saint-Petersburg, 14th Line 7, Office 49, Vasilievsky Island
*E-mail: dmitry.kondrik@niersc.spb.ru

This work is a comprehensive 20-year satellite study. Intra- and inter-annual (1998–2018) spatio-temporal variations were studied: (*i*) intensity and area / localization of *E. huxleyi* blooms in the subarctic and arctic seas (North, Greenland, Labrador, Norwegian, Barents and Bering seas), (*ii*) the total content of inorganic carbon in the bloom areas; and (*iii*) the effect of blooms of this alga, both on the partial pressure of CO₂ in the surface layer of the investigated seas and on the atmospheric CO₂ content in the blooming zone. The analysis of the physical forcing factors on the formation and development of coccolithophore blooms has been performed and their optimal values have been identified. Using machine learning methods, models that estimate the development of coccolithophore blooms in the polar and subpolar seas of the World Ocean based on satellite data on the values of physical environmental factors were built.

Keywords: satellite remote sensing; *Emiliana huxleyi*; machine learning; phytoplankton blooms; coccolithophores.

Кокколитофоры – группа морского одноклеточного кальцифицирующего фитопланктона, широко распространённого во всем Мировом океане. Вид *Emiliana huxleyi* является наиболее многочисленным и продуктивным среди данной группы фитопланктона [1]. Это поистине космополитический планктонный вид, способный существовать в субполярных, умеренных, субтропических и тропических широтах [2], а также в водах с различным трофическим статусом [3]. В процессе кальцификации, наращивании «панциря» из кальцита вокруг клетки, данная группа фитопланктона способна оказывать влияние на глобальный углеродный цикл посредством продуцирования неорганического углерода [4]. Для оценки их вклада в систему океан-атмосфера необходим анализ динамики пространственно-временного

распределения цветений, а также необходимо понимать процессы формирования цветений и какие факторы на это влияют. Факторы среды, влияющие на формирование и развития цветений *E. huxleyi*, в сложном взаимодействии между собой оказывает влияние целый набор факторов окружающей среды, как биотических, так и абиотических.

В данной работе был проведен многолетний (1998–2018 гг.) анализ цветений *E. huxleyi* в морях субарктического и арктического региона – Северном, Гренландском, Лабрадорском, Норвежском, Баренцевом и Беринговом морях.

Для идентификации цветений использовался алгоритм, основанный на спектральных характеристиках областей цветений *E. huxleyi*, определяемых по спутниковым данным по цвету океана [5]. По полученным данным, изучались внутри- и межгодовые (1998–2018 гг.) пространственно-временные вариации (*i*) интенсивности и площади/локализации цветений в исследуемых акваториях.

Для оценки влияющих факторов на формирование и развитие цветений необходимо учитывать все доступные факторы среды. Однако в виду того, что исследование включает в себя достаточно обширные по площади акватории и продолжительный промежуток времени, использование судовых *in situ* измерений в анализе невозможно, из-за их недостаточного количества для полноценного статистического анализа. Таким образом, исследование ограничивалось исключительно дистанционно получаемыми данными по таким влияющим факторам, как температура и соленость поверхности моря (SST и SSS), скорость течения (CS), глубина слоя Экмана (ELD) [полученная из скорости ветра над поверхностью воды (WS)], фотосинтетически активная радиация (PAR). Работа проводилась с применением многомерного статистического анализа, а именно алгоритма машинного обучения Random Forest Classifier, реализация которого доступна в библиотеке scikit-learn для Python. В ходе применения метода были получены статистические модели, описывающие комплексное влияние среды на формирование и развитие цветений *E. huxleyi* в исследуемых морях с соответствующими метриками качества (МКМ) – Точность (*Precision*), Полнота (*Recall*) и f1-score:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$f1 - score = \frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

где TP – истинно положительные, FP – ложно положительные и FN – ложно отрицательные значения, f1-score – взвешенное среднее между Точностью и Полнотой.

Ввиду того, что спутниковые данные по SSS доступны только с 2010 г., анализ проводился для двух периодов времени: 1998–2016 гг. и 2010–2016 гг.

Было показано, что вышеупомянутые пространственно-временные вариации, присущие цветениям *E. huxleyi*, являются специфичными для каждого моря. Это означает, что развитие *E. huxleyi* обычно обусловлено множеством факторов, действующих через механизмы прямых и обратных связей. Были выявлены и ранжированы факторы, наиболее сильно влияющие на формирование и развитие цветений микроводоросли *E. huxleyi* и размеры их площади (S). Показано, что значения S могут достигать нескольких сотен тысяч и даже миллионов квадратных километров.

В результате моделирования было выявлено, что набор влияющих факторов, обуславливающих формирование цветения или его отсутствие, специфичен в каждом из исследуемых морей. В таблице 1 для каждого исследуемого моря перечислены все исследуемые параметры и соответствующие им диапазоны значимостей для двух периодов исследования. Ниже указаны метрики качества лучшей из пяти моделей (МКМ). Под метриками качества в таблице указаны размеры обучающей и тестовой выборки в количестве точек. Из таблицы 1 можно видеть, что в подавляющем большинстве МКМ превышают значение в 70%, при этом физический фактор или набор таковых, определяющий наличие или отсутствие цветений для каждого моря уникален, и, в целом, ранжирование факторов для двух исследуемых периодов сохраняется. Так, в случае Гренландского и Лабрадорского морей ведущую роль в формировании цветения занимает SST, тогда как в Баренцевом море SST оказывала совокупное влияние вместе с PAR. В Северном море, помимо SST, наблюдается влияние CS (до 20% от общего вклада исследуемых влияющих факторов среды).

При этом ранжирование влияющих факторов при моделировании на более продолжительном периоде времени (1998–2016 гг.) сохранялось не во всех исследуемых акваториях. Так, в случае

Норвежского моря ELD был наиболее значимым фактором в течение 2010–2016 гг., но на более продолжительном периоде времени роль ELD снижается, а SST и PAR становятся наиболее важными. В случае с Беринговым морем наиболее значимым фактором на более продолжительном периоде времени выступает CS, тогда как на более коротком периоде наиболее значимыми факторами выступают SSS и PAR). Возможно, такое изменение в ранжировании влияющих факторов было вызвано некоторыми специфическими условиями окружающей среды, которые произошли в течение 1998–2001 гг., когда наблюдались аномально обширные цветения *E. huxleyi*.

Таблица 1

Результаты машинного обучения для цветений *E. huxleyi* и соответствующие метрики качества моделей

Фактор среды	Баренцево море		Гренландское море		Северное море	
	2010-2016	1998-2016	2010-2016	1998-2016	2010-2016	1998-2016
	Значимость фактора среды (%)					
SST	65-66	78-79	100	100	70	76
SSS	4	-	0	-	8	-
PAR	27	17-19	0	0	7	2
ELD	3	1	0	0	5	2
CS	0	2	0	0	11	20
	Метрики качества модели					
Precision	0.81 (0.86; 0.76)	0.82 (0.91; 0.73)	0.94 (0.98; 0.89)	0.84 (0.82; 0.85)	0.70 (0.73; 0.66)	0.79 (0.88; 0.70)
Recall	0.80 (0.72; 0.88)	0.80 (0.66; 0.93)	0.93 (0.88; 0.98)	0.84 (0.86; 0.82)	0.69 (0.61; 0.78)	0.76 (0.60; 0.92)
f1-score	0.80 (0.78; 0.82)	0.79 (0.76; 0.82)	0.93 (0.93; 0.94)	0.84 (0.84; 0.83)	0.69 (0.66; 0.72)	0.75 (0.71; 0.79)
Размер выборки (Обучающей/тестовой)	584262/ 128992	1295086/ 358014	18866/ 8890	40784/ 10442	120048/ 34274	345636/ 85800
Фактор среды	Берингово море		Лабрадорское море		Норвежское море	
	Значимость фактора среды (%)					
SST	13-19	32	81-100	91	32-34	60-64
SSS	35-40	-	0-13	-	4-5	-
PAR	25-27	0	0-2	2	2-3	18-19
ELD	12-13	0	0-2	0-1	48-51	9-12
CS	8	68	0-2	6	9-10	1-10
	Метрики качества модели					
Precision	0.88 (0.98; 0.79)	0.65 (0.73; 0.57)	0.82 (0.88; 0.76)	0.91 (0.97; 0.85)	0.72 (0.75; 0.68)	0.72 (0.73; 0.72)
Recall	0.86 (0.73; 0.99)	0.61 (0.34; 0.87)	0.81 (0.72; 0.90)	0.90 (0.82; 0.98)	0.71 (0.62; 0.80)	0.72 (0.71; 0.74)
f1-score	0.86 (0.84; 0.87)	0.58 (0.46; 0.69)	0.81 (0.79; 0.83)	0.90 (0.89; 0.91)	0.71 (0.68; 0.73)	0.72 (0.72; 0.73)
Размер выборки (Обучающей/тестовой)	75482/ 16062	365226/ 86076	83814/ 21578	221176/ 55442	67850/ 12844	195760/ 76144

Оценка точности определения локализации цветений, прогнозируемой с помощью моделей Random Forest Classifier, дополнительно выполнялась с помощью картографической визуализации, которая иллюстрирует несоответствие моделируемых и реально наблюдаемых цветений. На всех картах была выявлена одна и та же особенность: процент прогнозируемых цветений был очень высоким, и практически не было морских районов, в пределах которых фактическое цветение не было предсказано моделью. Этот результат явно свидетельствует о правильности выявленных факторов, определяющих цветение, а также об адекватности разработанных моделей и их полезности для ранжирования факторов.

Данная работа была поддержана Российским Научным Фондом по проекту №17-17-01117.

ЛИТЕРАТУРА

1. McIntyre A., Bé A.W. Modern coccolithophoridae in the Atlantic Ocean: I. Placoliths and cyrtoliths // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1967. № 14(5). P. 61–564.
2. Brown C.W., Woder J.A. Coccolithophorid blooms in the global ocean // Journal of Geophysical Research. 1994. № 99. P. 7467–7482.
3. Paasche, E. A review of the coccolithophorid *Emiliana huxleyi* (Prismnemosiophyceae) with particular reference to growth, coccolith formation, and calcification-photosynthesis interactions // Phycologia. 2002. № 40(6) P. 503–529.
4. Thierstein H.R., Young J.R., eds. Coccolithophores: From Molecular Processes to Global Impact. Berlin: Springer. 2004. 565 p.
5. Kondrik D., Pozdnyakov D., Pettersson L. Particulate inorganic carbon production within *E. huxleyi* blooms in subpolar and polar seas: a satellite time series study (1998–2013) // International Journal of Remote Sensing. 2017. № 38:22. P. 6179–6205. doi:10.1080/01431161.2017.1350304

Леонтьев А.Л.^{1,2,3*}, Никитина А.В.^{1,2,3}, Чистяков А.Е.^{3,4}

Учет нелинейных эффектов в модели динамики популяции промысловой рыбы

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет»
Россия, 344006, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

²Общество с ограниченной ответственностью «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров»
Россия, 347900, Таганрог, пер. Итальянский, дом 106

³Научно-технологический университет «Сириус»
Россия, 354340, Сочи, Олимпийский проспект, 1
*E-mail: Leontyev_Anton@mail.ru

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный технический университет»
Россия, 344000, Ростов-на-Дону, Площадь Гагарина, 1

Работа посвящена исследованию ихтиологических процессов на основе модели межвидового взаимодействия планктона и промысловых рыб Азовского моря с учетом эффектов Ферхюльста и Олли, конкуренции за ресурсы, таксиса, вылова, пространственного распределения биогенных веществ и детрита. Дискретный аналог разработанной модельной задачи водной экологии, являющейся частью программного комплекса, был получен на основе схем повышенного порядка точности с учетом частичной заполненности расчетных ячеек. Система сеточных уравнений большой размерности, возникающая при дискретизации модельной ихтиологической задачи, решена на основе модифицированного попеременно-треугольного метода. Благодаря разработанному программному инструментарию были проанализированы процессы воспроизводства мелководных водоемов в реальном и ускоренном масштабах времени.

Ключевые слова: математическая модель, ихтиологический процесс, Азовское море, эффекты Ферхюльста и Олли, взаимодействие популяций планктона и рыб, таксис, алгоритм, программный комплекс.

Anton L. Leontyev^{1,2,3*}, Alla V. Nikitina^{1,2,3}, Alexander E. Chistyakov^{3,4}

Investigation of nonlinear effects in a commercial fish population model

¹Southern Federal University,
Russia, 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42

²Supercomputers and Neurocomputers Research Center,
Russia, 347900, Taganrog, Italyansky lane, 106

³Scientific and Technological University «Sirius»
Russia, 354349, Sochi, Olympiyskiy prospekt, 1
*E-mail: Leontyev_Anton@mail.ru

⁴Don State Technical University
Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1

Paper covers the research of ichthyological processes based on a model of interspecific interaction between plankton and fish of the Azov Sea, considering the Verhulst and Allee effects, competition for resources, taxis, catch, spatial distribution of nutrient and detritus. Discrete analogue of developed model problem of water ecology, which is part of software, was calculated using the high-order accuracy schemes taking into account the partial filling of computational cells. The system of large-dimensional grid equations that arises during discretization was solved using the modified alternately triangular method. Due to the developed software, the reproduction processes of shallow waters were analyzed in real and accelerated time.

Keywords: mathematical model, ichthyological process, Azov Sea, Verhulst and Allee effects, the interaction of plankton and fish populations, taxis, algorithm, software.

Введение

Создание математического и программно-алгоритмического инструментария для прогностического моделирования значимых пространственных гидробиологических процессов и использования данных относительно недорогих экспериментов, не оказывающих негативного воздействия на экосистему, является актуальным на сегодняшний день. Разработкой концепций исследования водных экосистем занимались многие ученые, такие как Лотка А.Д., Вольтерра В., Свирежев Ю.М., Логофет Д.О., Абакумов В.А. [1], Константинов А.С., Винберг Г.Г., Одум Г.Т., Розенберг Г.С. [2]. Методы оценки результатов гидробиологического мониторинга разработаны Макрушиным А.В., Бакановым А.И., Мордухай-Болтовским Д.Д., Тэнсли А., Розенцвейгом М., Макартуром Р.Х., Luck R.F. [3], Bergman A.A. Нелинейные эффекты взаимодействия биологических популяций в воде исследовали Бердников С.В., Тютюнов Ю.В., Переварюха А. Ю., Stephens P.A., Sutherland W.J., Arditi R., Zhou S.R., Liu Y.-F., Wang G. Ихтиологические исследования динамики популяций рыб являются практически важными и теоретически сложными областями математического моделирования. По данным Азовского научно-исследовательского института рыбного хозяйства (АзНИИРХ), в августе 2018 года в акватории Азовского моря был запрещен коммерческий лов пеленгаса, леща и судака. Из 40 видов промысловых рыб в настоящее время в Азовском море вылавливают в основном только три вида: сардину, бычка и хамсу.

Постановка задачи

Согласно литературным данным, биологическую очистку водоема можно осуществлять путем зарыбления ее ценными промысловыми рыбами. Для исследования нелинейных эффектов в динамике биоценоза мелководного водоема (Азовского моря) на основе работ Розенцвейга М.Л., Рикера В.Е., Холлинга К.С., Ардити Р., Тютюнова Ю.В., Косьяна Р.Д., Пряхина Ю.В. разработана многовидовая модель взаимодействия планктона и промысловой рыбы пеленгас:

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}S_i) = \mu_i \Delta S_i + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_i \frac{\partial S_i}{\partial z} \right) + \psi_i, \quad \psi_1 = g_1(S_1, S_3) - \delta_1 S_1 S_2 - \lambda_1 S_1 - \sigma_1 S_1 S_5,$$

$$\psi_2 = g_2(S_1, S_2) - \lambda_2 S_2 - \delta_2 S_2, \quad \psi_3 = \gamma_3 \lambda_4 S_4 - g_3(S_1, S_3) + B(\tilde{S}_3 - S_3) + f, \quad (1)$$

$$\psi_4 = \lambda_1 S_1 - g_4(S_4, S_5) + \lambda_2 S_2 - \lambda_4 S_4, \quad \psi_5 = g_5(S_4, S_5) - \lambda_5 S_5 - \delta_5 S_5,$$

где S_i – концентрация i -го компонента, $i=1,5$; ψ_i – химико-биологический источник (сток),
 S_1 – концентрация фитопланктона (*Coscinodiscus*) (X), S_2 – зоопланктона (*Copepod*) (Z), S_3 – биогенного вещества (S), S_4 – детрита (D), S_5 – пеленгаса (*Mugil soiuu Basilewsky*) (P); \mathbf{U} – поле скоростей потока воды; $\mathbf{U} = \mathbf{u} + \mathbf{u}_{0i}$ – скорость конвективного массопереноса; \mathbf{u}_{0i} – скорость осаждения i -го вещества под действием силы тяжести, $i = \overline{1,4}$; g_i – трофические функции, B – коэффициент поступления S . Предположим, что $g_1(S_1, S_3) = \gamma_1 \alpha_3 S_1 S_3$, $g_2(S_1, S_2) = \gamma_2 \delta_1 S_1 S_2$, $g_3(S_1, S_3) = \alpha_3 S_1 S_3$, $g_4(S_4, S_5) = \beta_4 S_4 S_5$, $g_5(S_1, S_4, S_5) = (\gamma_5 \beta_4 S_4 + \xi_5 \sigma_1 S_1) S_5$, где α_3 – коэффициент потребления S фитопланктоном; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_5$ – коэффициенты переноса трофических функций; γ_3 – доля S в биомассе X ; λ_1 – коэффициент, учитывающий смертность и метаболизм X ; δ_1 – потеря X при употреблении в пищу Z ; λ_2, λ_5 – коэффициенты элиминации (смертности) Z, P соответственно; δ_2 – потеря Z при употреблении в пищу рыбы; δ_5 – потеря P при употреблении в пищу рыбы; \tilde{S}_3 – это максимально возможная концентрация S ; f – функция источника загрязнения; B – удельная скорость поступления S ; λ_4 – коэффициент разложения детрита; β_4 – норма расхода органических остатков P ; σ_1 – коэффициент

потерь X в результате потребления его P ; ξ_5 – коэффициент переноса роста концентрации P за счет X ; μ_i, ν_i – коэффициенты диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях,

Зададим начальные условия

$$S_i|_{t=0} = S_{i0}(x, y, z), i = \overline{1,5} \quad (2)$$

и граничные условия:

$$S_i = 0 \text{ на } \sigma (\mathbf{U}_n < 0); \frac{\partial S_i}{\partial \mathbf{n}} = 0 \text{ на } \sigma (\mathbf{U}_n \geq 0); \frac{\partial S_i}{\partial z} = \varphi(S_i) \text{ на } \Sigma_0; \frac{\partial S_i}{\partial z} = -\varepsilon_i S_i \text{ на } \Sigma_H, \quad (3)$$

где ε_i – неотрицательные константы; $\varepsilon_1, \varepsilon_3, \varepsilon_5$ учитывают опускание планктона и рыб на дно и их затопление; $\varepsilon_2, \varepsilon_4$ учитывают поглощение питательных веществ и детрита донными отложениями; φ – заданная функция; Σ_0, Σ_H – поверхность и дно водоема.

Схематически модель «рыба – фитопланктон – зоопланктон – питательные вещества – детрит» ($X-Z-S-D-P$) представлена на рис. 1.

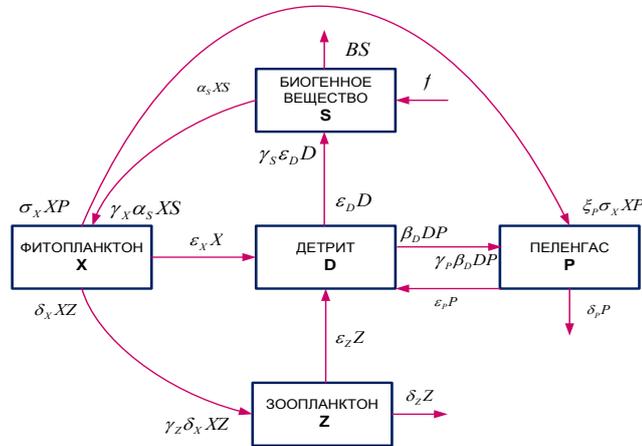


Рис. 1. Схема $X-Z-S-D-P$ модели

В качестве входных данных для модели (1) – (3) использовались результаты расчетов по модели гидродинамики Азовского моря [4], учитывающие влияние ветра, речные потоки (Дон, Кубань, Миус и около 40 малых водотоков), водообмен с другими водами, рельеф дна, сложную форму береговой линии, трение о дно, температуру, соленость, испарение и осадки, силу Кориолиса.

Исследование нелинейных эффектов динамики биоценозов

Одним из наиболее характерных свойств биологических объектов является широкий спектр нелинейных эффектов, в пределах которых система функционирует нормально [1].

Таксис пелагических (обитающих в толще воды) рыб при моделировании рассматривался явно, так как он определяет движение скопления рыб в акватории в любом масштабе. К системе (1) – (3) добавим уравнение:

$$\frac{\partial \mathbf{u}_5}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}_5 \mathbf{u}_5) = \mu_u \Delta \mathbf{u}_5 + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_u \frac{\partial \mathbf{u}_5}{\partial z} \right) - \alpha_u \mathbf{u}_5 + k_1 \text{grad} S_1 + k_4 \text{grad} S_4, \quad (4)$$

где $\mathbf{U}_5 = \mathbf{u} + \mathbf{u}_5$ – скорость конвективного переноса пеленгаса; \mathbf{u}_5 – скорость движения рыбы относительно воды; k_1, k_4 – коэффициенты таксиса; μ_u, ν_u – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузионной составляющей скорости таксиса; α_u – коэффициент инерционного движения рыбы.

Для рационального использования, популяционного прогнозирования, выявления лимитирующих факторов, защиты и восстановления популяций биоценозов водоемов необходимо учитывать такой важный фактор, как эффект Олли. Он основан на двух фундаментальных законах экологии о лимитирующих факторах: Либиха и Шелфорда. Были исследованы различные типы эволюционных процессов, в том числе Ферхюльста (логистическое население) и население «Олли». В работе проанализированы нелинейные эффекты, возникающие в модели возрастной структуры популяций промысловых рыб. Для исследования слабого или сильного Олли эффекта необходимо проанализировать интенсивность промыслового вылова рыбы и выбрать ее пороговое значение, при котором коллапс невозможен (рис. 2). Демографический эффект Олли обусловлен свойствами самой популяции и всегда проявляется, когда ее численность невелика. Этот эффект может возникать вследствие особенностей пищевой цепи, а также под влиянием внешних факторов, в том числе солености, температуры и освещенности. На основе разработанной ихтиологической модели (1) – (3) исследована кинетика Ферхюльста при различных начальных условиях (2) (рис. 3). Для калибровки и верификации разработанных моделей гидрофизики, входящих в ПК, использовались данные портала Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане «ЕСИМО», портала «Аналитические ГИС», разработанного Институтом передачи информации РАН (Москва).

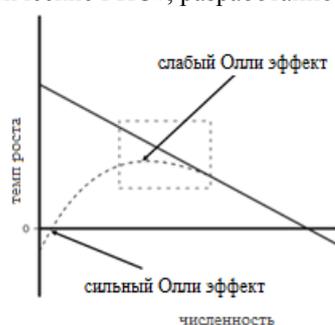


Рис. 2. Олли эффект в ихтиологической модели

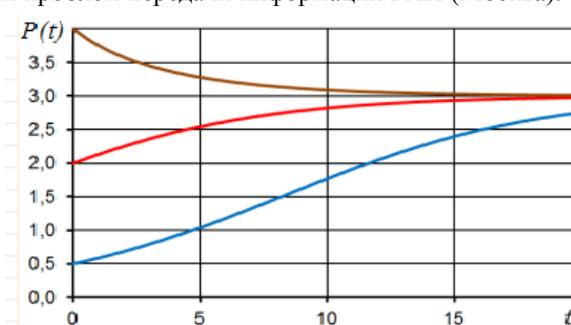


Рис. 3. Кинетика Ферхюльста для ихтиологической модели

В качестве входных данных для моделирования гидрофизических процессов помимо экспедиционных данных, литературных источников использовались данные НИЦ «Планета», данные «АзНИИРХ», ФГУ «Азовморинформцентра». На рис. 4 представлено экспедиционное судно «Денеб» и маршрут движения по акватории Азовского моря [5].

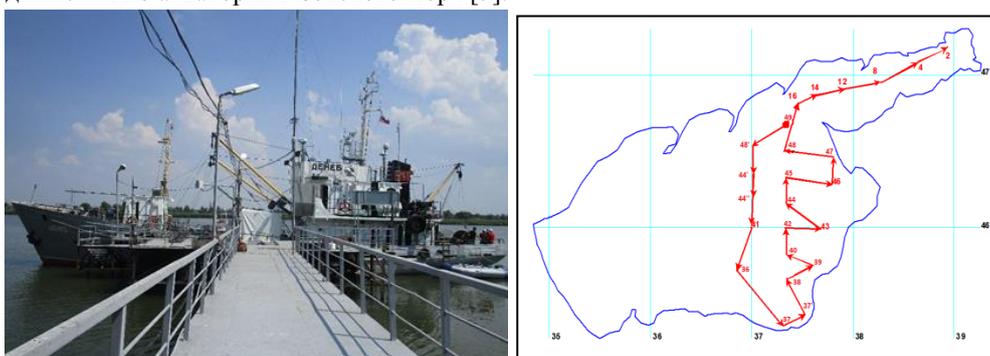


Рис. 4. Экспедиционные исследования

Описание программного комплекса

Программный комплекс (ПК) «Azov3D» был разработан для решения задачи биологической кинетики [4]. ПК включает в себя следующие модули: модуль управления, океанологические и метеорологические базы данных, прикладную библиотеку для решения задач гидробиологии, интеграцию с различными геоинформационными системами (ГИС), что дает дополнительные возможности для более качественного и сложного пространственного анализа, а решения, основанные на ней, более точны.

Результаты расчета концентрации загрязняющих биогенных веществ (S_3) для модельной задачи эволюции биоценоза мелководного водоема (1) – (3) приведены на рис. 5 а), а изменения концентрации

фитопланктона (S_1) – на рис. 5 б) (начальное распределение полей стока воды при северном ветре $\mu_3 = 5 \cdot 10^{-10}$; $\nu_3 = 10^{-10}$; $B = 0,001$; $\tilde{S}_3 = 1$; $f = 3$; $\tau_i = 0,1$; $i = \overline{1,5}$; $\lambda_2 = 0,8$; $\mu_1 = 5 \cdot 10^{-11}$; $\nu_1 = 10^{-11}$).

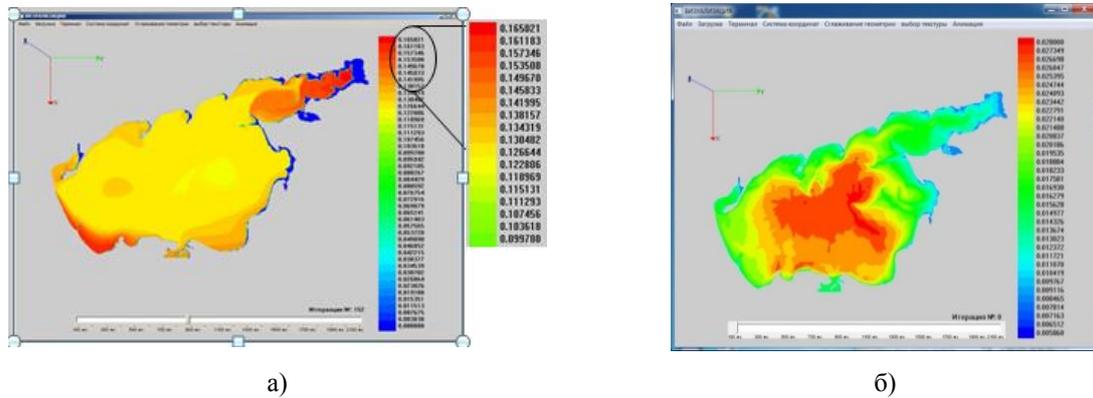


Рис. 5. Результаты численного эксперимента с ПК

Результаты моделирования возможных сценариев развития экосистемы Азовского моря (изменения концентрации промысловой рыбы пеленгас) приведены на рис. 6, 7 (начальное распределение скоростей водного потока при северном ветре). На рис. 6а временной интервал $T = 26$ дней, на рис. 6б $T = 62$ дня.

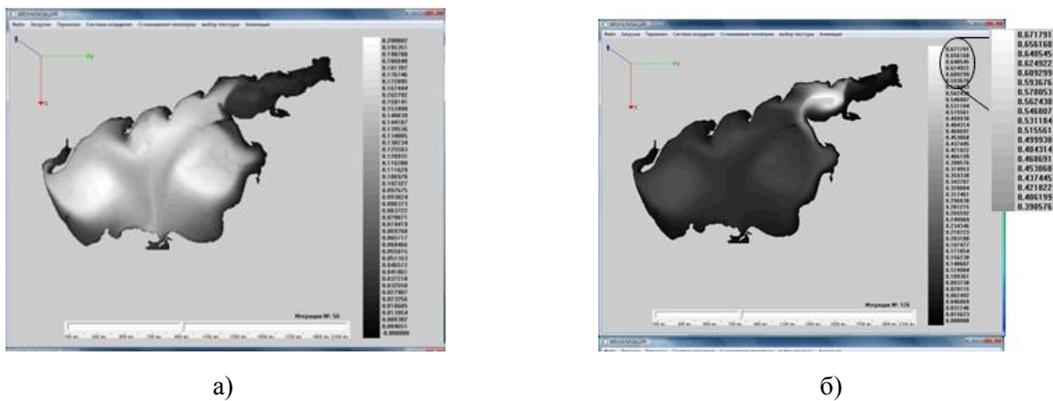


Рис. 6. Распределение концентрации детрита

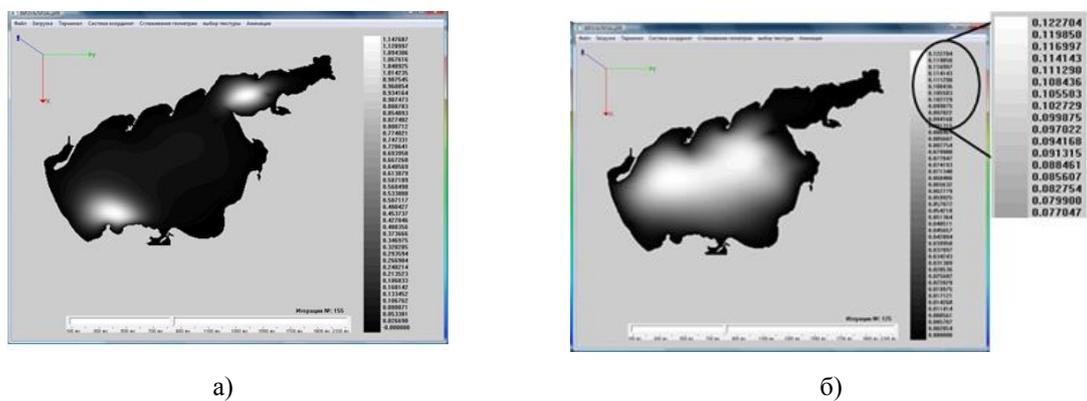


Рис. 7. Распределение концентрации пеленгаса

На рис. 7а временной интервал $T = 25$ дней, на рис. 7б $T = 76$ дней. Значения параметров: $\mu_4 = 5 \cdot 10^{-11}$; $\nu_4 = 10^{-11}$; $\varepsilon_4 = 1,9 \cdot 10^{-5}$; $\beta_4 = 0,1$; $\lambda_4 = 0,4$; $\mu_5 = 1,5 \cdot 10^{-3}$; $\nu_5 = 1,6 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_5 = 0,125$; $\lambda_5 = 1,16 \cdot 10^{-3}$; $\xi_5 = 0,8$; $\varepsilon_5 = 0,47$; $\delta_5 = 0,05$.

Используя результаты численного эксперимента можно проанализировать возможный сценарий зарыбления Азовского моря промысловой рыбой пеленгас, участвующей в донной мелиорации областей скопления детрита.

Заключение

Анализ нелинейных факторов в процессах биологической кинетики, включая эффекты Ферхюльста и Олли, конкуренции за ресурсы, таксиса, вылова, пространственного распределения питательных биогенных веществ и детрита выполнен на основе многовидовой модели взаимодействия планктона и промысловой рыбы пеленгас. В связи с этим исследовано влияние конкуренции за ресурсы, особенностей пищевой цепи, биотических и абиотических факторов на процессы воспроизводства в водной экосистеме.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-51017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абакумов А.И., Израильский Ю.Г. Стабилизирующая роль структуры рыбной популяции в условиях промысла при случайных воздействиях среды обитания // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. № 9. С. 609–620.
2. Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Устойчивость гидроэкосистем: обзор проблемы // Аридные экосистемы. 2014. № 4. С. 11–23.
3. Luck R.F. Evaluation of natural enemies for biological control: a behavioral approach // Trends in Ecology and Evolution. 1990. Vol. 5. №. 4. P. 196–199.
4. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Угольницкий Г.А., Усов А.Б., Никитина А.В., Пучкин М.В., Семенов И.С. Теоретико-игровые регламенты механизмов управления устойчивым развитием мелководных экосистем // Автоматика и телемеханика. 2017. № 6. С. 122–137.
5. Gushchin V.A., Sukhinov A.I., Nikitina A.V., Chistyakov A.E., Semenyakina A.A. A Model of Transport and Transformation of Biogenic Elements in the Coastal System and Its Numerical Implementation // Computational Mathematics and Mathematical Physics, vol. 58, No. 8, 2018. Pp. 1316–1333.

Лысенко С.А.

Оценки роли местного испарения и в формировании осадков на территории Беларуси

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси»
Беларусь, 220114, Минск, Ф. Скорины ул., дом 10
E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Для оценок возможностей изменения гидрологических процессов под влиянием искусственного осушения или обводнения земель необходим анализ степени воздействия местного испарения на режим выпадения осадков на мелиорируемой территории. В работе проведены численные расчеты пространственного распределения атмосферных осадков, выпадающих в отдельные месяцы вегетационного периода за счет испарения с территорий Беларуси. Проанализированы тенденции изменения количества осадков в Беларуси и их связь с глобальными и региональными климатическими факторами. Показано, что уменьшение испарения на территории Гомельской области после осушительной мелиорации во второй половине прошлого века не могло повлиять на наблюдаемую там скорость снижения количества осадков в июне более чем на 10 %.

Ключевые слова: испарение, осадки, мелиорация, изменение климата.

Lysenko S.A.

The role of local evaporation in the formation of precipitation in Belarus

State Scientific Institution
«Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus»
Belarus, 220114, Minsk, F. Skoriny Str., 10
E-mail: lysenko.nature@gmail.com

This paper analyzes the impact of local evaporation on the precipitation in the reclaimed area. We need this study to assess the potential for changes in hydrological processes under the impact of artificial drainage or waterlogging. With this aim in view, we carried out a set of numerical tests that simulate the spatial distribution of atmospheric precipitation falling in the growing season due to evaporation in the territory of Belarus. On this basis, the relationship of precipitation with some climatic factors in Belarus was analyzed. Among other things, we showed that a decrease in evaporation in the Gomel region after drainage reclamation in the second half of the last century could not affect the rate of decrease in precipitation observed in June by more than 10%.

Keywords: evaporation, precipitation, land reclamation, climate change.

В последние десятилетия на территории Земного шара в целом и Беларуси в частности отмечается выраженная тенденция к потеплению климата, обусловленная в первую очередь глобальными процессами. Однако, несмотря на благоприятные общие тенденции изменения теплообеспеченности территории Беларуси, на мелиорированных торфяных почвах отмечаются более экстремальные условия для возделывания сельскохозяйственных культур, чем в остальной части Беларуси [1].

Мелиорация в Полесье изменила физические характеристики подстилающей поверхности и, вероятно, привела к региональным изменениям климата. Сброс больших объемов воды в Мировой океан в результате мелиорации наиболее существенным образом отразился на гидрологических характеристиках почв. Уменьшение испарения мелиорированных территорий, вероятно, внесло свой вклад в процессы изменения регионального климата и, в первую очередь, повлияло на режим выпадения осадков на мелиорированных и прилегающих к ним территориях.

В настоящей статье представлены численные оценки влияния местного испарения на средние значения и долгопериодные изменения количества осадков в Беларуси. Установлены тенденции в изменении количества осадков на территории Беларуси и проанализированы их связи с глобальными и региональными климатическими факторами. Оценено влияния южных областей Беларуси (Брестской и

Гомельской) на поля осадков в отдельные месяцы вегетационного периода. Разделены вклады местного испарения и глобальных факторов в тенденции изменения количества осадков на территории Беларуси.

Методы исследования

Оценки влияния испарения с подстилающей поверхности на региональный влагооборот атмосферы основывались на решении уравнения водного баланса в предположении стационарности содержания влаги в столбе атмосферы при месячном интервале усреднения. Уравнение водного баланса атмосферы записывается отдельно для влаги, образованной в рассматриваемом регионе (индекс r) и влаги, занесенной в него извне (индекс a). Дополнительно предполагается, что интегральные содержания в атмосфере водяного пара различного происхождения пропорциональны соответствующим им скоростям выпадения осадков и горизонтальным потокам влаги из региона. Используемые предположения позволяют выразить долю осадков, выпадающих в некоторой пространственной ячейке с координатами (x, y) из влаги, испарившейся со всей площади исследуемого региона [2, 3]:

$$\rho(x, y) = \frac{Q_r^{in}(x, y) + \delta(x, y)E(x, y)\Delta A(x, y)}{Q_r^{in}(x, y) + Q_a^{in}(x, y) + E(x, y)\Delta A(x, y)}, \quad (1)$$

где ΔA – площадь ячейки; Q_r^{in} и Q_a^{in} – потоки влаги, поступающей в ячейку за счет испарения в исследуемом регионе и за его пределами; E – испарение с подстилающей поверхности внутри самой ячейки, δ – безразмерный множитель, равный единице, если ячейка находится внутри исследуемого региона, и нулю в противном случае.

При пространственной дискретизации территории потоки влаги, поступающей из разных направлений в заданную пространственную ячейку, совпадают с потоками влаги, выходящей в этих же направлениях из смежных ячеек. Влага, выходящая из каждой ячейки, включает компоненту, образованную в исследуемом регионе и за его пределами. Эти компоненты можно рассчитать, зная общий поток, выходящей из ячейки влаги, и функцию распределения $\rho(x, y)$: $Q_r^{out}(x, y) = Q^{out}(x, y)\rho(x, y)$, $Q_a^{out}(x, y) = Q^{out}(x, y)(1 - \rho(x, y))$. Поскольку распределение $\rho(x, y)$ неизвестно и само по себе подлежит установлению, то для вычисления всех составляющих влагооборота атмосферы используется итерационный алгоритм решения системы приведенных выше уравнений для всей дискретизируемой области.

Испарение с подстилающей поверхности и потоки влаги в широтном и меридиональном направлениях взяты из базы данных ERA5 – реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды с 1979 г. Для исследования тенденций изменения составляющих влагооборота атмосферы на более длительном временном интервале (с 1948 г.) использовался реанализ NCEP Национального центра прогнозов окружающей среды США. Однако, учитывая грубое пространственное разрешение метеорологических полей, представленных реанализом NCEP (около 2.5° по широте и долготе местности), соответствующие ему данные использовались лишь для анализа крупномасштабных изменений климата. Пространственные распределения линейных трендов количества осадков на территории Беларуси рассчитывались на основе сеточного архива метеорологических данных, разработанного в Институте природопользования НАН Беларуси [7].

Результаты

Вклады в местного испарения и адвекции влаги на территорию Беларуси с разных направлений сопоставлены на рис. 1.

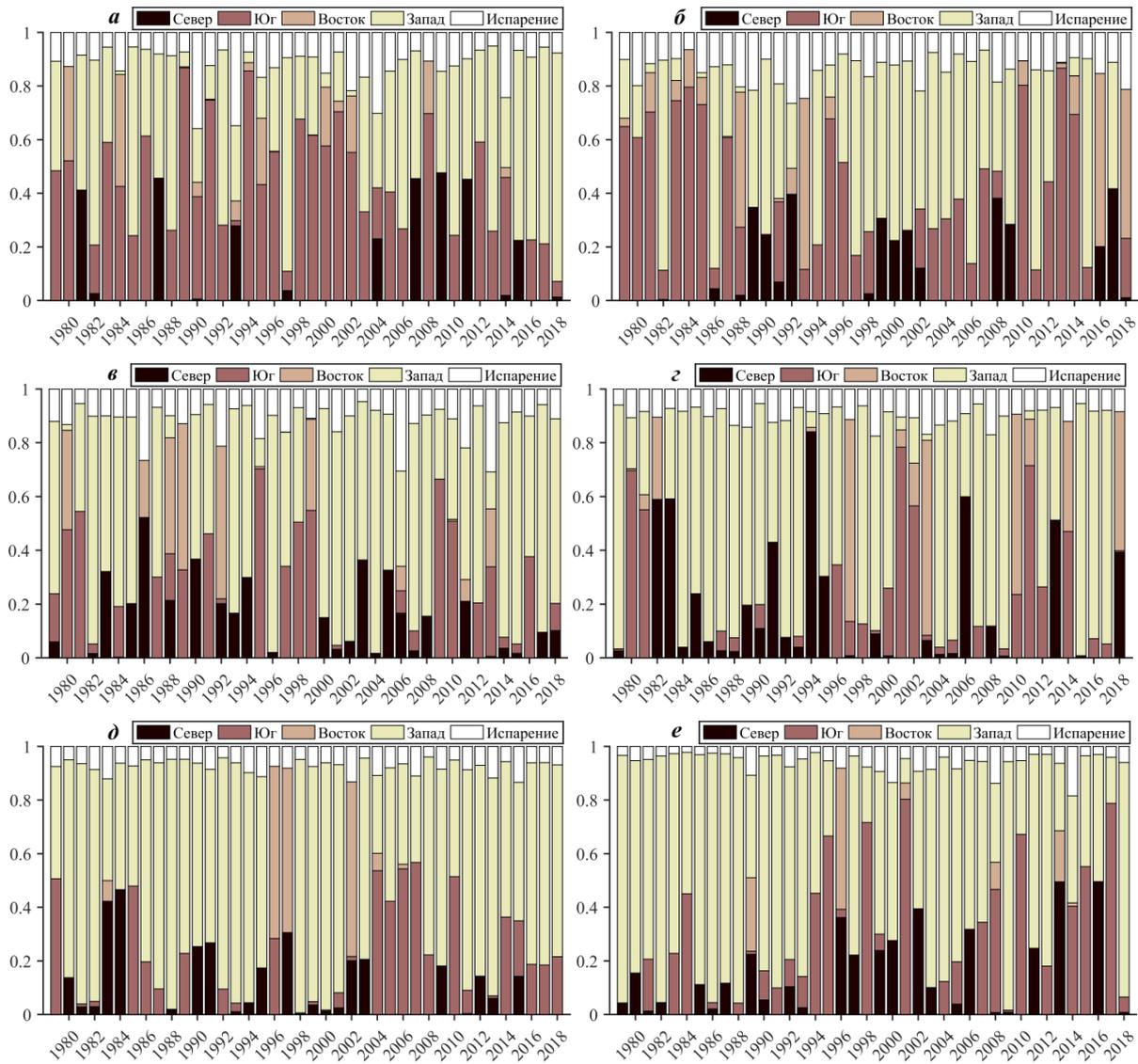


Рис. 1. Разделение вкладов местного испарения и адвекции влаги (поступления в регион извне) в количество выпадающих осадков на территории Беларуси в апреле (а), мае (б), июне (в), июле (г), августе (д) и сентябре (е)

В весенние месяцы вегетационного периода водяной пар в атмосферу над Беларусью в основном поступает с юго-запада. По мере продвижения воздушных потоков на северо-восток они обогащаются влагой, что свидетельствует о важной роли местного испарения в весенние месяцы. В это время года почва содержит достаточные запасы влаги и на фоне сравнительно невысокого количества адвективной (поступающей извне) влаги способна вносить ощутимый вклад в формирование осадков, особенно за счет южных регионов Беларуси, где среднесуточное испарение на 0.2–0.4 мм превосходит среднесуточное количество осадков. Средний вклад осадков, выпадающих на всей территории Беларуси за счет местного испарения, в их общее количество составляет примерно 12.4 и 13.5 % в апреле и мае соответственно. Наиболее значимое влияние местное испарение оказывает на режим выпадения осадков на северо-востоке Беларуси, поскольку именно сюда воздушные потоки больше всего заносят влаги, испаряемой с подстилающей поверхности.

В летние месяцы ситуация с режимом формирования осадков на территории Беларуси выглядит несколько иначе. В эти месяцы в атмосферной циркуляции преобладают зональные потоки влажного воздуха с Атлантики, приносящие в Беларусь гораздо больше влаги, чем в весенние месяцы. Средняя для

территории Беларуси доля осадков, сформированных местным испарением, составляет 11.9% в июне, 9.4% в июле и 5.8% в августе. Область пространственной локализации этих осадков приходится преимущественно на Могилевскую и Гомельскую области, что связано с наибольшей доставкой в эти области влаги с остальной территории Беларуси.

В сентябре потоки влаги, поступающие с запада на территорию Беларуси, имеют сильную широтную зависимость, выражающуюся в быстром увеличении западной адвекции влаги по мере увеличения широты местности. В соответствии с этим обстоятельством больше всего осадков выпадает в самой северной области Беларуси – Витебской. Интенсивная адвекция влаги в сентябре и низкое испарение с высушенной за лето подстилающей поверхности приводит к тому, что в сентябре количество осадков на всей территории Беларуси за исключением западной части Гомельской области превалирует над испарением.

Следует особо обратить внимание на сравнительно низкое количество осадков на территории Гомельской области практически во все месяцы вегетационного периода. Стабильно низкое увлажнение территории Гомельской области в вегетационный период при высоких темпах потепления, свойственных южным регионам Беларуси, способствует засухливости климата и негативно сказывается на биологической продуктивности экосистем. На протяжении всего вегетационного периода испарение на территории Гомельской области превышает скорость ее увлажнения осадками. При этом, несмотря на то, что летом в Беларуси большая доля осадков из паров местного испарения образуется именно на территории Гомельской области, они не компенсируют имеющийся в ней дефицит осадков.

В Брестской области в мае выпадает сравнительно большое количество осадков (по сравнению с другими областями Беларуси), что способствует накоплению почвой влаги и лучшей защищенности экосистем в период летних засух, когда складывается дефицит осадков. В то же время, в связи с особенностями атмосферной циркуляции в весенние месяцы (юго-западный перенос воздуха), влага, испаряющаяся с территорий других областей Беларуси, практически не оказывает влияния на режим выпадения осадков в Брестской области. В результате вклад местного испарения в количество осадков на территории Брестской области составляет лишь около 5 %. В то же время, испаряющаяся на территории Брестской области и переносимая воздушными потоками в северо-восточном направлении, может существенно увеличивать количество осадков в Минской, Витебской и Могилевской областях.

С июня по сентябрь, когда на территории Беларуси преобладает западный перенос воздушных масс, Брестская область также практически не попадает в зону влияния влаги, выносимой с территорий других областей Беларуси, а эффекты местного испарения в самой Брестской области не способны существенно повлиять на режим выпадения осадков в ней (эффект на уровне единиц процентов). При этом испарение с территории Брестской области может несколько улучшать гидрологический режим на территории Гомельской области в летние месяцы.

Представляет интерес сопоставить наблюдаемые изменения гидрологических условий на юге Беларуси с глобальными изменениями климата. Особого внимания заслуживает анализ среднесуточного количества осадков и среднесуточного испарения с подстилающей поверхности в Гомельской области и ее окрестностях (квадрат с широтой 51.0–53.5° с.ш. и долготой 27–32° в.д.) за периоды до мелиорации (1945–1965 гг.), во время интенсивной мелиорации (1965–1985 гг.) и после мелиорации (1985–2018 гг.). Соответствующие временные ряды, полученные на основе данных реанализа NCEP для первого летнего месяца, когда происходит активная вегетация и формирование урожая сельскохозяйственных культур, приведены на рис. 2. Видно, что с 1948 года и примерно до окончания мелиоративных работ в Полесье испарение с подстилающей поверхности и количество осадков в рассматриваемом регионе медленно возрастали (примерно с одинаковой скоростью около 0.1 мм за 10 лет). В период после мелиорации (с 1985 года), примерно совпадающий с периодом современного потепления в Беларуси, как испарение, так и количество осадков на рассматриваемой территории начали заметно уменьшаться, однако скорость уменьшения количества осадков более чем в 4 раза превышала скорость уменьшения испарения. Такое значительное превышение тренда осадков над трендом испарения свидетельствует о том, что уменьшение испарения с подстилающей поверхности является не причиной, а следствием уменьшения количества осадков в рассматриваемом регионе. Более медленное уменьшение испарения по сравнению с уменьшением количества осадков, вероятно, обусловлено влиянием на испарение других метеорологических факторов. Главным фактором, определяющим фактическое и потенциальное испарение, является температура воздуха. Средняя температура июня в Беларуси с 1980 г. выросла приблизительно на 1.7 °С, что, безусловно, способствовало росту испарения.

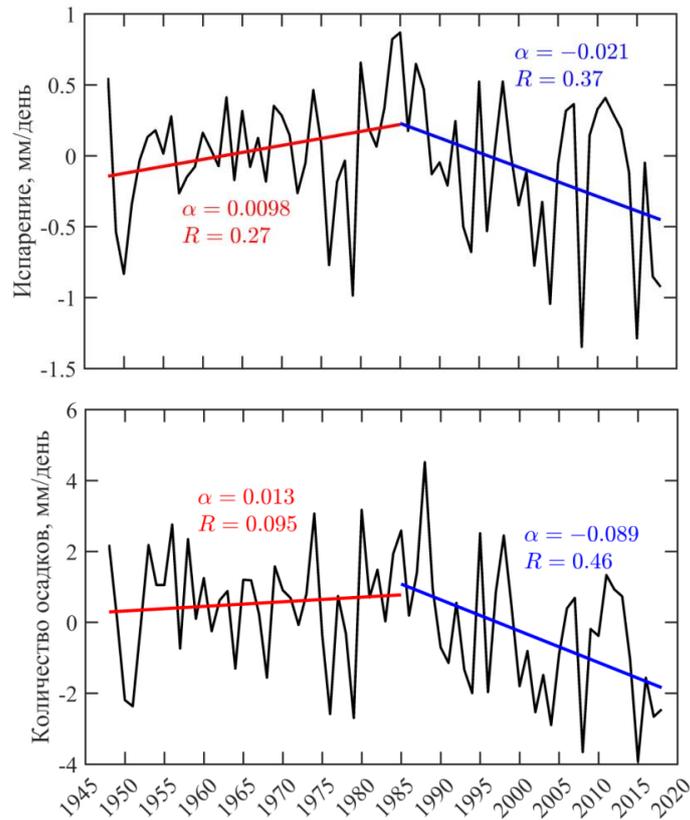


Рис. 2. Временные ряды среднесуточного испарения с подстилающей поверхности и среднесуточного количества осадков в регионе Гомельской области и ее окрестностях, ограниченных координатами 51° и 53.5° с.ш., 27° и 32° в.д.

Стоит заметить, что снижение количества осадков в июне с 1985 года характерно не только для Гомельской области Беларуси. Данные реанализов NCEP и ERA5 показывают, что с 1985 г. на большей части восточной Европы происходит снижение содержания водяного пара в атмосфере, что в условиях роста температуры затрудняет формирование облаков и выпадение осадков.

Тренд суммы осадков в июне, вызванный снижением испарения в Гомельской области после 1985 г., достигает максимальных величин около -0.2% в год, тогда как фактическая величина этого тренда на порядок больше. Таким образом, современные изменения количества осадков на территории Беларуси в июне вызваны крупномасштабными изменениями атмосферной циркуляции и не связаны с последствиями осушительной мелиорации в Полесье.

Заключение

Мелиоративные мероприятия за счет способны повлиять на количество весенне-летних осадков в южных регионах Беларуси не более чем на 10 %. Весной эти изменения в большей степени могут отразиться на режиме увлажнения территорий других областей Беларуси, расположенных на пути юго-западных воздушных потоков. С июня по сентябрь, когда адвекция в Беларуси происходит преимущественно с запада на восток, влага, выносимая воздушными потоками из Брестской области, способствует увеличению количества осадков в Гомельской области (суммарный вклад с самой Гомельской областью около 10 %). Однако влага, как местного происхождения, так и выносимая с территорий других областей, не компенсирует дефицит осадков, возникающий в Гомельской области в весенние и летние месяцы.

Осушительная мелиорация земель в Полесье во второй половине прошлого века не изменила существенным образом суммарное испарение в масштабах всей Гомельской области. Значимое уменьшение испарения на территории Гомельской области в июне началось уже после проведения основных мелиоративных работ (примерно с 1985 г.). Однако это является не причиной, а следствием снижения количества июльских осадков, тренд которого в 4 раза превышает тренд испарения с территории Гомельской области. Снижение испарения с территории Гомельской области потенциально может обуславливать не более 10 % наблюдаемого тренда количества июньских осадков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / Минск, УП «Энциклопедикс», 2020, 218 с.
2. Eltahir E.A.B., Bras R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1994. Vol. 120, № 518. P. 861–880.
3. Лысенко С. А., Логинов В. Ф., Мельник В. И. Влияние местного испарения на количество осадков, выпадающих на территории Беларуси в вегетационный период // Природопользование. 2019. № 2. С. 32–43.
4. Лысенко С.А., Чернышев В.Д., Коляда В.В. Сеточный архив метеорологических данных для республики Беларусь и возможности его применения для исследования пространственно-временных особенностей изменений климата // Природопользование. 2019. № 1. С.17–27.

Лысенко С.А., Логинов В.Ф.

Оценки воздействия экваториальной зоны Тихого океана на температуру воздуха над сушей Северного полушария

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси»
Беларусь, 220114, Минск, Ф. Скорины ул., дом 10
E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Выполнен пространственно-временной анализ связи интегрального содержания водяного пара в атмосфере в зимние месяцы года с аномалиями температуры поверхностного слоя воды в экваториальной зоне Тихого океана. Показано, что для суши средних и высоких широт Северного полушария эта связь проявляется с задержкой не более месяца. В зависимости от знака температурной аномалии в экваториальной зоне Тихого океана, содержание водяного пара в атмосфере над сушей широтного пояса 30–75°с.ш. в зимние месяцы может понижаться или повышаться, соответственно, замедляя или усиливая эффект антропогенного глобального потепления. На этой основе дается объяснение смены тенденции изменения зимней температуры воздуха в Северном полушарии в конце 60-х и в конце 90-х годов прошлого века.

Ключевые слова: изменение климата, южная осцилляция, водяной пар, зимняя температура воздуха.

Lysenko S.A., Loginov V.F.

On the effect of the equatorial zone of the Pacific Ocean on air temperature over the land of the Northern Hemisphere

State Scientific Institution
«Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus»
Belarus, 220114, Minsk, F. Skoriny Str., 10
E-mail: lysenko.nature@gmail.com

We perform a spatial-temporal analysis of the relationship between the content of water vapor in the atmosphere during the winter months and the anomalies in the temperature of the surface water layer in the equatorial zone of the Pacific Ocean. This relationship was demonstrated to have a delay in no more than a month over the land in the middle latitudes and in the high latitudes of the Northern Hemisphere. The temperature anomalies in the Pacific zone were demonstrated may have a tangible effect on the water vapor content in the atmosphere above the land of 0–75° North latitude. Depending on the sign of the temperature anomaly, the water vapor content therewith may decrease or increase, respectively, slowing down or enhancing the effect of anthropogenic global warming. With these considerations in mind, we provide an explanation of the trend in winter air temperature in the northern hemisphere in the late 60s and late 90s of the last century.

Keywords: climate change, southern oscillation, water vapor, winter air temperature.

На протяжении последнего столетия характер изменения глобальной и региональной температуры в различные сезоны года существенно различался. Если в период предыдущего потепления климата, известного из литературы, как «период потепления Арктики», рост температуры наблюдался особенно ярко в теплое время года, то начиная с конца 60-х и до конца 90-х годов прошлого столетия, наибольший рост температуры отмечался зимой [1].

Потепление зимнего типа хорошо укладывается в современные представления об изменениях климата, согласно которым зимой эффекты глобального потепления должны усиливаться за счет сокращения снежного покрова подстилающей поверхности и уменьшения ее альбедо. Последние 15–20 лет происходит быстрый рост летних температур, а зимняя температура растет сравнительно слабо, т. е. снова формируется потепление летнего типа. В период 1998–2014 гг. зимняя температура воздуха над континентами Северного полушария даже понижалась со средней скоростью -0.038 К/год, а снежный покров увеличивался со скоростью 1.4×10^5 км²/год (рис. 1).

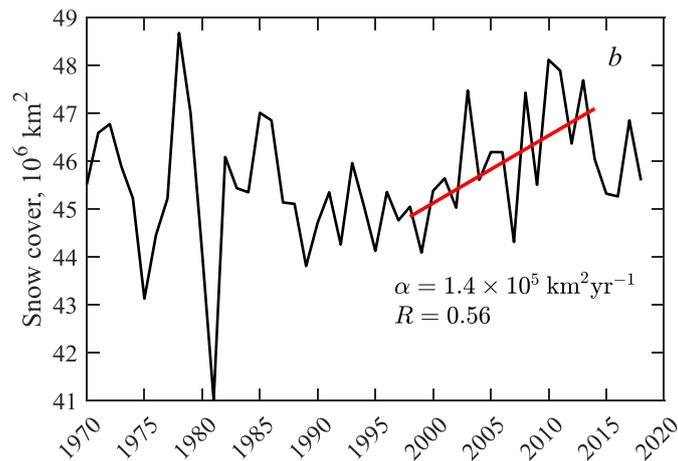


Рис. 1. Временная динамика суммарного снежного покрова материков Северного полушария с декабря по январь [2]

В настоящей работе пространственно-временные особенности изменений зимней температуры воздуха над сушей Северного полушария объясняются циклической модуляцией интегрального содержания водяного пара в атмосфере (TCWV, Total Column Water Vapour), связанной с Эль-Ниньо – Южной осцилляцией (ENSO). Исследуется связь ENSO с пространственным распределением TCWV над сушей средних и высоких широт в зимние месяцы года. На этой основе дается объяснение смены тенденции изменения зимней температуры воздуха в Северном полушарии в конце 60-х и в конце 90-х годов прошлого века.

Изменение радиационного баланса

Для понимания причин изменений зимней температуры воздуха над сушей Северного полушария рассмотрим особенности формирования радиационного баланса для региона Сибири, в котором с 1998 по 2014 гг. наблюдалось наибольшее понижение температуры приземного воздуха в зимние месяцы (43–63° с.ш., 47–110° в.д.). Радиационный баланс на верхней границе атмосферы представлен как данными измерений спутниковой системой CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System), так и результатами его численного моделирования на рис. 2. Коэффициент корреляции между смоделированным радиационным балансом на верхней границе атмосферы и зимней температурой воздуха составляет 0.85, что практически не отличается от коэффициента корреляции этой температуры с реально измеряемым радиационным балансом (0.86). При этом расчеты по переносу излучения в атмосфере показывают, что общим содержанием водяного пара в атмосфере (TCWV, Total Column Water Vapor) объясняется около 85% дисперсии радиационного баланса.

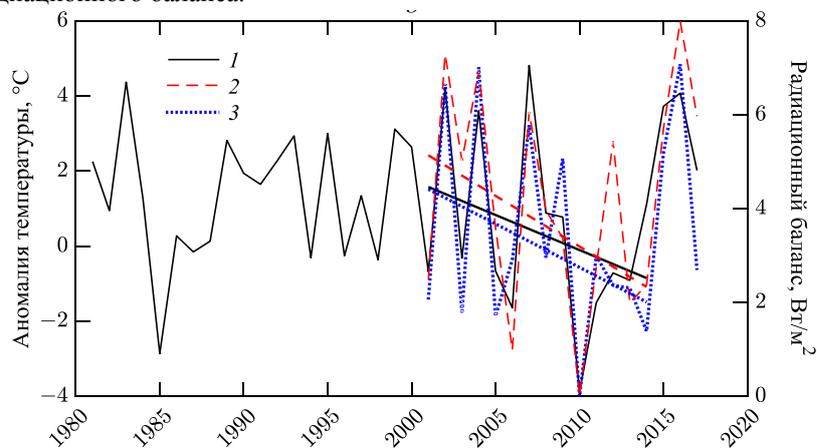


Рис. 2. Сопоставление средней аномалии температуры воздуха в январе–феврале в сибирском регионе, ограниченном координатами 43–63° с.ш., 47–110° в.д., с радиационным балансом на верхней границе атмосферы: 1 – аномалия температуры, 2 и 3 – измеренный и рассчитанный радиационный баланс соответственно

Связь южной осцилляции с содержанием водяного пара в атмосфере средних и высоких широт

Если сопоставить скорости изменения зимней температуры приземного воздуха за периоды 1968–1998 гг. и 1998–2013 гг. на всей территории Земного шара, то можно обнаружить, что с 1998 г. произошла смена тенденций изменений температуры во многих крупных регионах Северного полушария Земли (быстрый рост зимней температуры сменился ее столь же быстрым понижением). Можно предположить, что такая инверсия тенденции изменения зимней температуры воздуха на территории Северного полушария является следствием смены фазы некоторого глобального процесса в климатической системе. В связи с этим рассмотрим связь TCWV с одним из наиболее энергоемких циклических процессов в климате Земли – Эль-Ниньо – Южной осцилляцией (ENSO).

Корреляции между среднемесячными индексами Южной осцилляции Niño 3.4 и TCWV рассчитывались при их сдвиге во времени от 0 до 24 месяцев. Расчеты показали, что для суши средних и высоких широт Северного полушария (30–75°с.ш.) наиболее тесные корреляции между Niño 3.4 и TCWV проявляются в зимние месяцы с отставанием от фазы Niño 3.4 не более месяца. Зимние значения TCWV для суши широтного пояса 30–75°с.ш., полученные на основе реанализа ERA-Interim, сопоставлены с индексом Niño 3.4 на рис. 3 Видно, что изменения TCWV происходят в фазе с Niño 3.4. Коэффициент корреляции между ними $R = 0.61$, т. е. изменения индекса Niño 3.4 объясняют около 40 % дисперсии TCWV.

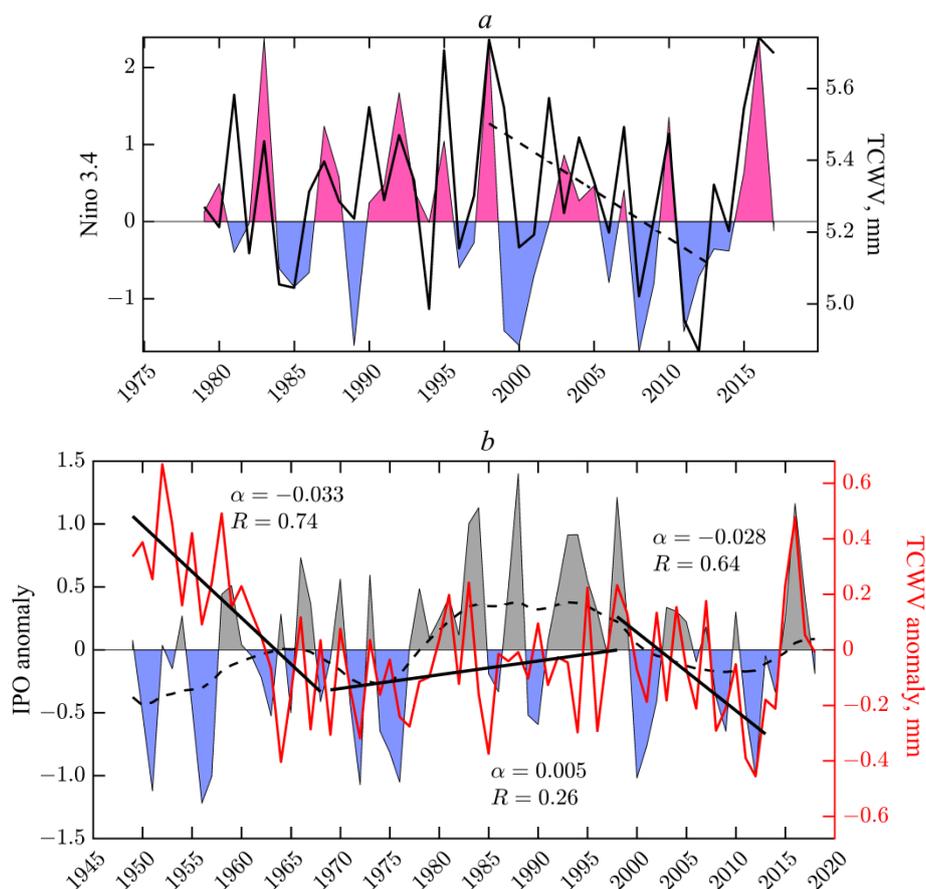


Рис. 3. Сопоставление средних значений TCWV из реанализов ERA-Interim (a) и NCEP (b) с индексами Южной осцилляции – Niño 3.4 (a) и IPO (b)

Если сопоставить данные реанализа NCEP, охватывающего более длинный временной ряд, чем реанализ ERA-Interim, с индексом многолетней тихоокеанской осцилляции IPO, характеризующим асимметрию температурной аномалии в экваториальной и внетропических частях Тихого океана (рис. 3), то можно заметить, что для суши широтного пояса 30–75° с.ш. периоды понижения TCWV (1948–1968, 1998–2013 гг.) примерно совпадают с отрицательными фазами Тихоокеанской осцилляции IPO (Interdecadal Pacific Oscillation). Понижение TCWV в указанные периоды, очевидно, приводило к ослаблению парникового эффекта водяного пара и к замедлению роста зимней температуры воздуха над континентами. С 1968 по 1998 г. содержание водяного пара в атмосфере над сушей средних и высоких

широт медленно повышалось на фоне положительной фазы IPO, что наряду с увеличением концентрации CO₂ и других антропогенных парниковых газов обуславливало рост приземной температуры воздуха.

Естественные процессы, способствовавшие замедлению темпов роста температуры земного шара с 1998 по 2014 гг., исследованы в нашей работе [3]. На основе данных дистанционного зондирования Земли и реанализа показана тесная связь глобального и регионального содержания водяного пара в атмосфере со скоростью приземного ветра и аномалиями температуры поверхностного слоя воды в тропической зоне Тихого океана. Усиление ветра в тропической зоне Тихого океана наблюдается с 1980 года (коэффициент линейного тренда 0.017 м·с⁻¹/год). Наибольшее усиление ветра пришлось на период 1992–2013 гг. (0.025 м·с⁻¹/год). В эти годы температура поверхностного слоя воды в центрально- и восточно-экваториальной зоне Тихого океана понижалась со скоростью 0.024 К/год, а глубинные воды на западе Тихого океана (к северу от экватора) накапливали тепло. Указанные тенденции способствовали уменьшению испарения с поверхности Тихого океана, которое с задержкой около года сказывается на глобальном содержании водяного пара в атмосфере (коэффициент корреляции 0.88). В результате среднее по планете содержание водяного пара в столбе атмосферы понижалось до 2014 г. со средней скоростью 0.12 мм/год. Расчеты модели переноса излучения в атмосфере показывают, что уменьшение интегрального содержания водяного пара в атмосфере с 2001 по 2014 годы снизило приходную часть радиационного баланса подстилающей поверхности примерно на 0.93 Вт/м², что в 11 раз превышает усиление парникового эффекта CO₂ за этот период. Такие тенденции изменений содержаний парниковых газов в атмосфере обуславливали понижение зимней температуры воздуха в Северном полушарии.

В тоже время, на фоне циклической смены фаз IPO не наблюдается смена тенденций изменений летней температуры воздуха. Причиной этому может быть положительная обратная связь между температурой воздуха и содержанием водяного пара в атмосфере, наиболее отчетливо проявляющаяся при высоких температурах. Известно, что потепление тропосферы происходит при практически неизменной относительной влажности [4]. Поддержание одного и того же уровня относительной влажности при увеличении температуры воздуха и соответствующего ей давления насыщенного водяного пара возможно только за счет увеличения концентрации водяного пара в атмосфере. Поскольку температурная зависимость давления насыщенного водяного пара усиливается с ростом температуры, то летом рост влагоемкости воздуха происходит быстрее, чем зимой, соответственно большим будет и усиление водяным паром парникового эффекта.

Другим фактором, обуславливающим различие скоростей изменения зимней и летней температур воздуха, может быть аэрозольное загрязнение атмосферы. Природоохранные мероприятия, проводимые в последние десятилетия во многих развитых странах, наряду с повышением экологического уровня промышленности и автотранспорта способствуют снижению аэрозольной эмиссии. Это, в свою очередь, способствует увеличению количества поступающего на Землю солнечного излучения и дневному прогреванию подстилающей поверхности. На территории Европы, где, как минимум с 2000 г. происходит очищение атмосферы от аэрозолей (о чем свидетельствуют данные спутникового спектрометра MODIS), скорость роста температуры приземного воздуха летом в дневное время действительно опережает скорость роста ночной температуры – 0.041 К/год против 0.035 К/год, что говорит о важной роли солнечной радиации в летнем потеплении.

Косвенным эффектом очищения атмосферы от аэрозолей может быть снижение облачности. Если судить по данным спутникового прибора MODIS, определяющего параметры облаков с 2000 г., то оптическая толщина облаков – их важнейший радиационный параметр – в средних и высоких широтах Северного полушария устойчиво уменьшается, а значит, на Землю поступает больше солнечной радиации. Это согласуется с данными реанализа ERA-Interim, демонстрирующими положительный линейный тренд потока нисходящего солнечного излучения на нижней границе атмосферы, причем отклонения потока солнечного излучения от этого тренда для суши широтного пояса 30–75°с.ш. отрицательно коррелируют с произведением оптической толщины облаков и степени покрытия ими атмосферы.

Заключение

Особенности современных изменений зимней температуры воздуха над сушей средних и высоких широт Северного полушария во многом связаны с циклическостью аномалии температуры поверхностного слоя воды в экваториальной зоне Тихого океана. Влияние Тихого океана на температуру воздуха над континентами передается посредством эффекта модуляции океаном интегрального содержания водяного пара в атмосфере. Задержка между индексом Niño 3.4 и интегральным содержанием водяного пара над

континентами широтного пояса 30–75°с.ш. составляет менее месяца, а коэффициент корреляции около 0.61.

В периоды с низкой частотой Эль-Ниньо (холодной фазы многолетней Тихоокеанской осцилляции) содержание водяного пара над сушей средних и высоких широт Северного полушария понижается, а вместе с ним ослабевает и общий парниковый эффект атмосферы, что приводит к замедлению скорости роста зимней температуры воздуха или даже к ее понижению. Вероятно, именно с этими эпизодами связана смена тенденций изменения зимней температуры воздуха в Северном полушарии в конце 60-х и в конце 90-х годов прошлого столетия.

Стабильный рост летней температуры воздуха в средних и высоких широтах Северного полушария, происходящий с конца 60-х годов прошлого столетия на фоне смены фаз многолетней Тихоокеанской осцилляции, можно объяснить несколькими причинами. Из них наибольшего внимания заслуживают следующие: 1) зависимость содержания водяного пара в атмосфере от температуры воздуха; 2) очищение атмосферы от аэрозолей в результате снижения вулканической активности и проведения природоохранных мероприятий во многих развитых странах; 3) уменьшение оптической толщины облаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логинов В.Ф., Лысенко С.А. Современные изменения глобального и регионального климата / Минск: Беларуская навука, 2019, 315 с.
2. Robinson, David A., Estilow, Thomas W.; and NOAA. CDR Program (2012): NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1. NOAA National Centers for Environmental Information.
3. Логинов В.Ф., Лысенко С.А. Оценка роли Тихого океана в изменениях современного климата // Доклады РАН. Серия географическая. 2019. № 2. С. 3–12.
4. Deser C., Guo R., Lehner F. Trajectories toward the 1.5°C Paris target: Modulation by the Interdecadal Pacific Oscillation // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. № 9. P. 4256–4262.

Максимович Н.Г. *, Мещерякова О.Ю., Березина О.А., Деменев А.Д.

**Современные методы изучения экологической ситуации в
горнодобывающих районах
(на примере Кизеловского угольного бассейна)**

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»
Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15
*E-mail: nmax@psu.ru

В работе рассмотрено современное экологическое состояние территории ликвидированного Кизеловского угольного бассейна, а также результаты анализа многолетнего ряда спутниковых снимков, рассматриваемые как элемент системы экологического мониторинга территории. Изученный район характеризуется наличием острых эколого-гидрологических проблем, которые необходимо решать комплексными методами. Одним из эффективных инструментов оценки масштабов бедствия и эффективным способом информационного обеспечения мониторинга экологической ситуации является создание проблемно-ориентированных бассейновых геоинформационных систем и методов комплексирования пространственной информации на основе математико-картографического моделирования, а также пространственно-временной анализ, тематическое дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли. В статье рассмотрена веб-ГИС, созданная для организации мониторинга и поддержки принятия управленческих решений, направленных на улучшение экологической ситуации. Также рассмотрено предложение к разработке информационной системы, позволяющей собрать в единую базу данные, получаемые со стационарных и мобильных измерительных устройств, включая материалы дистанционного зондирования Земли, для организации оперативного мониторинга в горнодобывающих районах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли; мониторинг; угледобыча; окружающая среда; экологическая ситуация.

**Nikolay G. Maksimovich*, Olga Yu. Meshcheriakova, Olga A. Berezina,
Artem D. Demenev**

**Modern methods for studying the environmental situation in mining areas
(on the example of the Kizel coal basin)**

Perm State University
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia
*E-mail: nmax@psu.ru

The paper considers the current ecological state of the territory of the liquidated Kizel coal basin, as well as the results of the analysis of a long-term series of satellite images, considered as an element of the ecological monitoring system of the territory. The studied area is characterized by the presence of acute environmental and hydrological problems that need to be addressed by integrated methods. One of the effective tools for assessing the scale of a disaster and an effective way of providing information for monitoring the environmental situation is the creation of problem-oriented basin geographic information systems and methods for combining spatial information based on mathematical-cartographic modeling, as well as spatial and temporal analysis, thematic interpretation of Earth remote sensing data. The article describes the created web-GIS to organize monitoring and support the adoption of managerial decisions aimed at improving the environmental situation. They also considered a proposal to develop an information system that allows collecting data from stationary and mobile measuring devices, including Earth remote sensing materials, into a single database for organizing operational monitoring in mining areas.

Keywords: Earth remote sensing; monitoring; coal mining; environment; ecological situation.

Введение

Оперативный экологический мониторинг подразумевает систему регулярных наблюдений и прогноза изменений земной поверхности в режиме 24/7, проводимых в том числе на основе материалов космической съемки Земли. Несмотря на очевидность необходимости его проведения, он редко находит практическое применение. Это связано с рядом организационных причин, отсутствием аппаратуры, программного обеспечения получения информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые были бы связаны в единую систему.

В настоящее время применение оперативного мониторинга связано с отслеживанием возникающих природных и техногенных чрезвычайных ситуаций. Подобные информационные системы (ИС) имеют глобальный характер для всей территории РФ. Локальные проблемы, связанные с техногенной нагрузкой на окружающую среду, остаются охваченными лишь стандартной редкой сетью пунктов мониторинга.

От оперативности получения данных мониторинга зависят природоохранные управленческие решения, оповещение населения и, соответственно, качество окружающей среды. В связи с этим было предложено разработать новую ИС экологического контроля в горнодобывающих районах. В качестве пилотного участка применения данной системы предлагается территория, подверженная воздействию ликвидированных шахт Кизеловского угольного бассейна (КУБ), где происходят изливы кислых шахтных вод с опасным для окружающей среды химическим составом.

Объект и методы

КУБ, находящийся в Пермском крае РФ, является классическим примером того, как после ликвидации угледобывающих предприятий обостряются экологические проблемы. На территории этого бассейна происходит интенсивное загрязнение окружающей среды, что обусловлено также особенностями угленосной толщи. Каменный уголь здесь отличается большим содержанием серы (5,8%), представленной, главным образом, в виде пирита. Среднее содержание многих тяжелых металлов превышает среднюю концентрацию по угольным месторождениям Восточно-Европейской платформы. Другой особенностью КУБа является его интенсивная закарстованность. Карст относится к голому и покрытому типам. В зонах развития карста водопритоки в шахты в свое время достигали 2500 м³/ч. Эти факторы явились решающими при формировании больших объемов кислых шахтных вод.

Шахты КУБа в период эксплуатации были одними из самых обводненных в стране: ежегодно в реки сбрасывалось практически без очистки около 100 млн м³ загрязненных шахтных вод, содержащих большое количество сульфатов, железа, алюминия. Средний суммарный водоприток в шахты в период их работы составлял 12–14 тыс. м³/час. Химический состав шахтных вод зависит в основном от гидродинамических условий, содержания в угленосной формации серы, карбонатов и рассеянных элементов. Если содержание серы в углях превышает 4%, то в результате окисления сульфидов вода приобретает кислую реакцию (рН = 2–3) и сульфатный состав. Трещинно-карстовые воды карбонатных пород, обладающие высоким окислительным потенциалом, нейтральной средой (рН = 7,3–7,5), гидрокарбонатно-кальциевым составом и минерализацией 0,06–1,5 г/л взаимодействуют в шахтах с богатыми серой угленосными породами и преобразуются в сульфатные железисто-алюминиевые натриево-кальциевые воды с минерализацией 2,5–19 г/л. В ходе эксплуатации она возматала до 35 г/л. Постоянный и интенсивный сток шахтных вод привел к тому, что химический состав рек в период эксплуатации шахт приблизился к химическому составу шахтных вод. Малые реки до впадения в них шахтных вод имели НСО₃-Са-На гидрохимическую фацию, минерализацию 90–150 мг/л и близкую к нейтральной реакцию среды. Ниже по течению стока шахтных вод они приобретают сульфатный железисто-алюминиевый состав при минерализации от 640 до 6000 мг/л. Содержание сульфатов составляет от 1000 до 3700, железа – от 70 до 900, алюминия – от 11 до 160 мг/л при рН 2,5–2,9.

После закрытия и ликвидации шахтного водоотлива горные выработки стали затапливаться, и на ряде шахт происходит излив шахтных вод на земную поверхность. Величина излива из затопленных шахт составляет от 20 до 80% от объема шахтных вод во время эксплуатации.

В настоящее время существуют более 19 участков излива шахтных вод на поверхность объемом 4,6–75 млн м³ в зависимости от водности года. Сохраняются высокие концентрации двухвалентного железа (3,6 г/л), алюминия (157 г/л), марганца (35 г/л), рН изменяется от 2,4 до 3,9.

Серьезной проблемой являются также стоки с шахтных отвалов. Концентрация загрязняющих веществ в них выше, чем в водах изливов, при схожем составе. Воздействие изливов на поверхностные воды на территории КУБа уже приобрело региональный масштаб. При смешивании шахтных вод с

речными водами и увеличении рН ион Fe^{2+} дольше, чем Fe^{3+} преобразуется в осадок. Это привело к загрязнению рек на протяжении десятков километров, чего не наблюдалось при работе шахт. Воды изливов поступают в 19 рек. В р. Кизел (притоке р. Вильвы), испытывающей наибольшее негативное влияние, среднегодовое содержание железа составляет 2160 ПДК (в зимнюю межень – до 4690 ПДК), марганца – 516 ПДК. Концентрации никеля, меди и цинка также превышают предельно допустимые [4, 8].

На основе многолетнего ряда спутниковых снимков решалась задача оценки загрязнения поверхностных водотоков за многолетний период. Для этого были получены спутниковые снимки Landsat TM, ETM+ и OLI (за 1987–2017 годы), а также Sentinel-2 MSI (за 2016–2017 годы) [3].

Таким образом, угледобывающие районы характеризуются наличием острых эколого-гидрологических проблем, которые необходимо решать комплексными методами [5, 10–12]. Одним из эффективных инструментов оценки масштабов бедствия и эффективным способом информационного обеспечения мониторинга экологической ситуации является создание проблемно-ориентированных бассейновых геоинформационных систем и методов комплексирования пространственной информации на основе математико-картографического моделирования, а также пространственно-временной анализ, тематическое дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли, полевые.

Результаты

В рамках реализации проекта РГО и РФФИ полученные результаты многолетнего мониторинга были интегрированы в разработанной проблемно-ориентированной бассейновой ГИС «Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна» (<http://kub.maps.psu.ru>) [2], основное назначение которой – организация мониторинга и поддержка принятия управленческих решений, направленных на улучшение экологической ситуации. В основу веб-ГИС КУБа положен бассейновый принцип, при котором для оценки состояния экосистем исследуемой территории используются водосборы рек. На основе ГИС были построены геофильтрационные модели и разработан комплекс рекомендуемых мероприятий по минимизации и ликвидации изливов шахтных вод [1, 6].

Разработанная веб-ГИС опубликована в открытом доступе и содержит максимально актуальную и объективную информацию об экологическом состоянии территории. Данные многолетнего мониторинга экологической ситуации на территории КУБа ранее были доступны только в ведомственных отчётах, поэтому сама по себе их публикация в открытом доступе на картографической основе является важнейшим результатом создания ГИС.

Однако данная веб-ГИС не обладает достаточной оперативностью, так как данные гидрохимических анализов отобранных проб и измеренных расходов и т.д. поступают в неё лишь через год, но она, в свою очередь, может являться основой для новой разрабатываемой ИС.

Основываясь на отечественном и зарубежном опыте [7, 9, 10, 11, 13], предлагаемая ИС будет использовать данные с дистанционных датчиков, установленных на водных объектах, и иметь систему оповещения в случае возникновения опасности, а также алгоритм обработки и анализа данных с мультиспектрального датчика в рамках бассейнового подхода, а также иметь открытый доступ для всего населения.

На территориях, подвергающихся интенсивному техногенному воздействию, необходимо проведение постоянного мониторинга состояния окружающей среды. Предлагаемая ИС позволит собрать в единую систему данные, получаемые со стационарных и мобильных измерительных устройств, включая материалы ДЗЗ, проводить их интегральный анализ, что позволит отображать реальную экологическую ситуацию исследуемых территорий, прогнозировать развитие ситуации, принимать оперативные меры по снижению негативного воздействия на окружающую среду, а также даст возможность оценить эффективность ранее используемых природоохранных мероприятий.

Предлагается использовать автономные датчики, установленные на водных объектах, измеряющие в режиме реального времени показатели основных загрязняющих веществ, и при их существенном изменении (ухудшении) проводить мультиспектральную съемку территории в основном долин рек с помощью беспилотных летательных аппаратов. Высокое спектральное разрешение этих данных позволяет (при качественно выполненной атмосферной коррекции) производить непосредственное сопоставление результатов спектрометрических измерений с данными содержания загрязняющих веществ в воде.

Полученные результаты показали, что многолетние ряды спутниковых данных могут рассматриваться как элемент системы экологического мониторинга в угледобывающих районах и успешно использоваться для оценки загрязнения рек кислыми шахтными водами и процесса деградации земель.

Наиболее информативной для оценки загрязнения поверхностных вод является разность яркости в синем и красном диапазонах спектра. На основе этих каналов предложен нормализованный разностный индекс АМWІ, который может являться элементом системы экологического мониторинга поверхностных водных объектов, загрязненных кислыми шахтными водами. В связи с этим совокупность анализа данных ДЗЗ и полученной информации с датчиков позволит оценить виды и масштабы загрязнения окружающей среды.

Основные компоненты разрабатываемой ИС представлены на архитектурной диаграмме (рис.). Ее уникальность заключается в программном интегрировании данных, получаемых как со стационарных, так и с мобильных дистанционных измерительных устройств, а также их дальнейшая обработка и анализ. Прямые аналоги на отечественном рынке отсутствуют, информации о подобных комплексных системах за рубежом, доведенных до внедрения в практику, не встречено.



Рис. Архитектурная диаграмма информационной системы

Выводы

Существующий в настоящее время подход к проведению мониторинга окружающей среды характеризуется значительной продолжительностью проведения работ по определению ее параметров, вызванной необходимостью отбора проб, их транспортировки, хранения и проведения лабораторного анализа. В связи с этим, данные мониторинга не позволяют оперативно информировать и оповещать органы власти и население об экологической опасности, а также зачастую теряют свою актуальность в процессе принятия управленческих решений в области охраны окружающей среды. Кроме того, на проведение мониторинга в настоящее время предусмотрены значительные финансовые затраты. Применительно к КУБу мониторинг затруднен в связи с удаленностью и труднодоступностью расположения источников загрязнения водных объектов. Разрабатываемый проект направлен на повышение оперативности и эффективности при решении данных проблем в области охраны окружающей среды.

В перспективе разработанная ГИС должна не только интегрировать ранее полученные данные мониторинга, но и стать элементом самой системы мониторинга. В частности, должна быть реализована возможность максимально оперативной публикации данных измерений для принятия управленческих решений, а также для оценки эффективности природоохранных мероприятий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50073 «Микрочастицы тяжелых металлов в гидросфере промышленных районов: идентификация источников, закономерности миграции и накопления, экологический риск» и № 17-45-590793 «Применение

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин Р.К., Березина О.А., Максимович Н.Г. Создание базы геоданных для оценки состояния окружающей среды ликвидированного Кизеловского угольного бассейна // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2018. Вып. 3. С. 3–17.
2. Абдуллин Р.К., Тарасов А.В., Пьянков С.В., Максимович Н.Г., Березина О.В., Сединин А.М., Шихов А.Н. Геоэкологическая база данных Кизеловского угольного бассейна. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620512, (БД, дата регистрации – 01.04.2019).
3. Березина О.А., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Применение многолетних рядов данных космической съёмки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 1–15.
4. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения: монография. Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т. 2018. 288 с.
5. Тарасенко И.А. Геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт. Москва: Изд-во ГЕОС, 2018. 247 с.
6. Berezina O., Maksimovich N., Meshcheriakova O. The Use of GIS for Minimization of the Technogenic Impact on the Environment (on the Example of the Kizel Coal Basin) // Proceedings of the V International Conference «Information Technologies in Earth Sciences and Applications for Geology, Mining and Economy» ITES&MP-2019, Moscow, Russia, 14–18 October, 2019. Moscow, 2019. p. 72.
7. Kopačková V. Using multiple spectral feature analysis for quantitative pH mapping in a mining environment. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 28, pp. 28–42. DOI:10.1016/j.jag.2013.10.008.
8. Maksimovich N., Pyankov S., Khayrulina E. Environmental assessment of closed coal mine territory using GIS analysis // Mine Water and Circular Economy, IMWA 2017. Lappeenranta, Finland, 2017. P. 212–217.
9. Raval S. Investigation of mine environmental monitoring with satellite based sensors. PhD. Thesis. School of Mining Engineering. The University of New South Wales, Sydney, 2011. 198 p.
10. Rianza A., Buzzi J., García-Meléndez E., Carrère V. and Müller A. Monitoring the extent of contamination from acid mine drainage in the Iberian pyrite belt (SW Spain) using hyperspectral imagery. Remote Sensing, 2011, 3(10), pp. 2166–2186. DOI:10.3390/rs3102166.
11. Rianza A., Buzzi J., García-Meléndez E., Carrère V., Sarmiento A., and Müller A. Monitoring acidic water in a polluted river with hyperspectral remote sensing (HyMap). Hydrological Sciences Journal, 2015, 60(6), pp. 1064–1077. DOI:10.1080/02626667.2014.899704.
12. RoyChowdury A., Sarkar D., Deng Y. et al. Mine Water Environment, 2017, 36: 248. DOI: 10.1007/s10230-016-0401-9.
13. Seifi A., Hosseinjanizadeh M., Ranjbar H. and Honarmand M. Identification of Acid Mine Drainage Potential Using Sentinel 2a Imagery and Field Data, Mine Water and the Environment, Article in Press, 2019. DOI:10.1007/s10230-019-00632-2.

**A. Mahura^{1*}, R. Nuterman², A. Baklanov^{3,2}, R. Makkonen^{4,1}, M. Boy¹,
T. Petäjä¹, H.K. Lappalainen^{4,1}, S. Zilitinkevich^{4,1}, M. Kulmala¹**

Multi-Scale And -Processes Online Integrated Modelling For Environmental Applications

¹Institute for Atmospheric and Earth System Research (INAR),
Faculty of Science, Physics / University of Helsinki (UHEL) Helsinki, Finland

* E-mail: alexander.mahura@helsinki.fi

²University of Copenhagen (UCPH), Niels Bohr Institute (NBI) Copenhagen, Denmark

³World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland

⁴Finnish Meteorological Institute (FMI), Helsinki, Finland

The development and application of seamless/ on-line integrated multi-scale and -processes modelling systems is expected to be able to handle and study many existing meteorology-chemistry-aerosols processes and interactions, which is difficult to investigate using the off-line modelling approach. The Environment – High Resolution Limited Area Model (Enviro-HIRLAM), as one of the models of the Pan-Eurasian EXperiment Modelling Platform (PEEX-MP) is presented on examples of studies for online integrated meteorology and atmospheric composition modelling with downscaling regional-subregional-urban scales; influence of urban areas considering different parameterizations on formation and development of meteorological and pollution patterns; interactions and feedbacks of meteorology vs aerosols/chemistry; etc. results of such studies are applicable for further assessment for risk/vulnerability/consequences/etc. studies. Accessibility to infrastructure with High Performance Computing is important for seamless modelling. The science education component is also realized through organization and carrying out of the research training weeks on integrated modelling. **Keywords:** online integrated modelling, Enviro-HIRLAM, PEEX, meteorology, atmospheric composition/pollution.

Introduction

The development and application of on-line integrated meteorology-chemistry-aerosols modelling systems is expected to be able to handle and study many existing processes and interactions, which is difficult to investigate using the off-line modelling approach. In particular, chemical species including aerosols can cause various complex effects in the atmosphere at different temporal and spatial scales. This depends on origin, chemical composition, lifetime, size, shape, optical properties, etc. The online modelling approach can be applied for multi-scale and –processes studies on interactions and feedbacks of meteorology vs aerosols/chemistry; aerosols vs. cloud formation and radiative forcing; boundary layer parameterizations; urbanization processes impact on changes in urban weather and climate; assessments for human and environment; improving prediction of extreme weather/ pollution events; etc. All these can be studied at different spatial (urban-subregional-regional) and temporal scales. In addition, added value to analysis is obtained through integration of modelling results into GIS environment for further risk/ vulnerability/ consequences/ etc. studies.

Methods and models

The modelling platform (MP) is important component of the PEEX research infrastructure. The PEEX-MP; www.atm.helsinki.fi/peex/index.php/modelling-platform) includes more than 30 different models running at different scales, resolutions, geographical domains, resolving different physical-chemical-biological processes, etc. and used as research tools providing insights and valuable information/ output for different level assessments for environment and population. These models cover main components - atmosphere, hydrosphere, pedosphere and biosphere. The seamless coupling multi-scale and -processes modelling concept developed is important and advanced step towards realization of the PEEX research agenda presented in the PEEX Science Plan (www.atm.helsinki.fi/peex/images/PEEX_Science_Plan.pdf). Accessibility to infrastructure with High Performance Computing is important for such modelling. INAR uses several models - such as EC-Earth, Enviro-HIRLAM, MALTE-Box - for realization of the PEEX Science Plan. In particular, here the Enviro-HIRLAM model usage will be presented on examples of studies for online integrated meteorology and atmospheric composition modelling with downscaling regional-subregional-urban scales; influence of urban areas considering different parameterizations on formation and development of meteorological and pollution patterns; interactions and feedbacks of meteorology vs aerosols/chemistry; etc. Results of such studies are applicable for further assessment for risk/ vulnerability/ consequences/ etc. studies.

The models used by INAR are continued development. The emphasis continued to be on evaluation and testing of the online integrated approach for in-depth sensitivity analyses of mechanisms, relationships, feedbacks, interactions, etc. between chemistry-aerosols and meteorology and assessment studies in a changing climate.

The Environment – High Resolution Limited Area Model [1] is continued to be developed as a fully online integrated numerical weather prediction (NWP) and atmospheric chemical transport (ACT) modelling system. In our studies, it is used in the research mode. Note, that the NWP part developed by HIRLAM consortium [2] and the Enviro-components/modules were developed in collaboration with the Universities from different countries (see all references in [1]).

The Enviro- consists modules for gas-phase chemistry CBMZ and aerosol microphysics M7, which includes sulfate, mineral dust, sea-salt, black and organic carbon. There are also modules of urbanization (anthropogenic heat flux and roughness, building effect parameterisation, and others) for land surface scheme, natural and anthropogenic emissions, nucleation, coagulation, condensation, dry and wet deposition, and sedimentation of aerosols. The improved Savijarvi radiation scheme takes into account explicitly for aerosol radiation interactions for 10 aerosol subtypes. The aerosol activation scheme was also implemented in STRACO condensation-convection scheme. The nucleation is dependent on aerosol properties and the ice-phase processes are reformulated in terms of classical nucleation theory. As the modelling system runs in a downscaling chain, for the outer model domain (run at low resolution) the initial and boundary conditions for meteorology and atmospheric conditions are taken from ECMWF. The vertical levels vary between 40-60. The finest horizontal resolution is about 1.5 km. The model can be run in both research and operational modes. Emissions include anthropogenic, biogenic, and natural; and these are pre-processed. Different parts of the model were evaluated vs. ETEX-1 experiment, Chernobyl accident, Paris summer/winter campaigns, etc. At urban scales, the model was tested (FPs FUMAPEX, MEGAPOLI, TRANSPHORM, PEGASOS, MACC, MarcoPolo projects) for several metropolitan areas such as: Copenhagen (Denmark), Paris (France), Rotterdam (The Netherlands), Vilnius (Lithuania), Bilbao (Spain), St. Petersburg (Russia), Shanghai (China). Several examples of the Enviro-HIRLAM model applicability are shown below.

Enviro-HIRLAM results of online integrated modelling

To study effects of urban areas, the Enviro-HIRLAM model at high resolution of 2+ km was used to study variability of multiple meteorological parameters including the air temperature at 2m on a diurnal cycle for Paris (France). The difference between the control/ reference and modified/ urbanized runs was studied, and these were found to be larger during nighttime – early morning hours. When the urban effects are included, these differences are more pronounced (effect of the urban heat island). It clearly underlines that the Paris metropolitan area is significantly warmer than the surrounding rural areas. Under the low wind conditions and with additional increases in anthropogenic heat fluxes (AHF) the impact of the city (or a so-called “foot-print”) can be extended farther (in south-eastern as dominating wind direction) as well as expanded in other directions (Fig. 1a). E.g. it leads to increasing the city’s heat signature and bringing a potential of urban influence for a distance of more than a 100 km away.

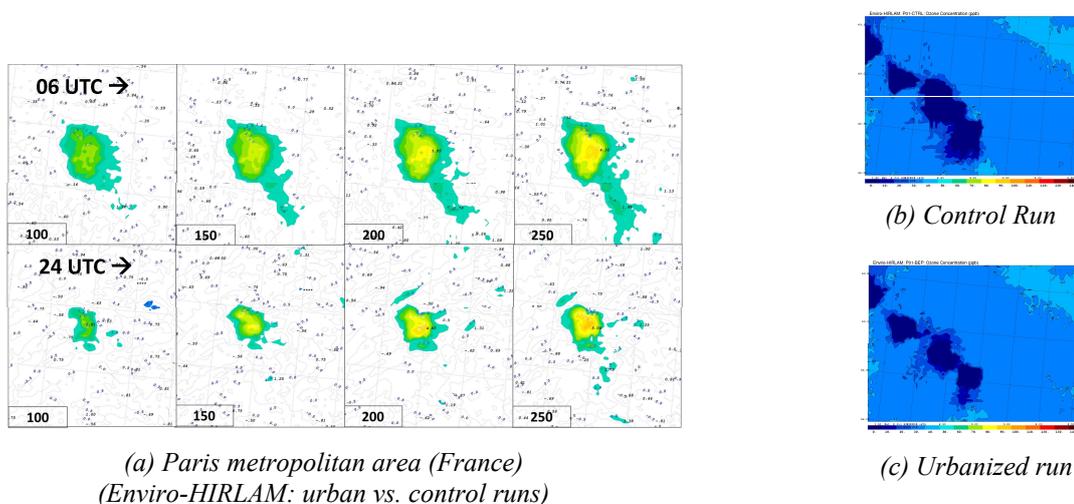


Figure 1: (a) Diurnal cycle variability of the difference fields for air temperature at 2m (in deg C) with changing anthropogenic heat fluxes (100, 150, 200, and 250 W/m²) on 4 Jul 2009 at 06 and 24 UTCs; & (b,c) Ozone concentration (in ppb) for the control vs. urbanized runs at 21 UTCs on 4 Jul 2009.

The temperature differences between urban vs. rural areas became more evident, and can reach more than 5°C (at 250 W/m²) at night on a summer day. The differences is also observed for chemical patterns, as shown on example of ozone (Fig. 1bc). Moreover, for both meteorological and chemical patterns these differences are also seen above the city and surroundings at several model levels (within the boundary layer), although such influence is decreasing with the height. To study aerosol feedbacks and interactions at regional scale in the Arctic-boreal domain, the Enviro-HIRLAM model was employed. It is run in a long-term mode for reference (CTRL) and aerosols effects (direct - DAE, indirect - IDAE, combined – DAE+IDAE – effects included) and at resolution of 15-5 km. Meteorology and atmospheric composition output (at 40 model levels) are simulated simultaneously. The initial and boundary conditions are taken from ECMWF; and anthropogenic, biogenic, and natural emissions are pre-processed. Analysis of variability for basic statistics (average, median, max, min, standard deviation) was performed for all model runs and differences between the model runs (Fig. 2).

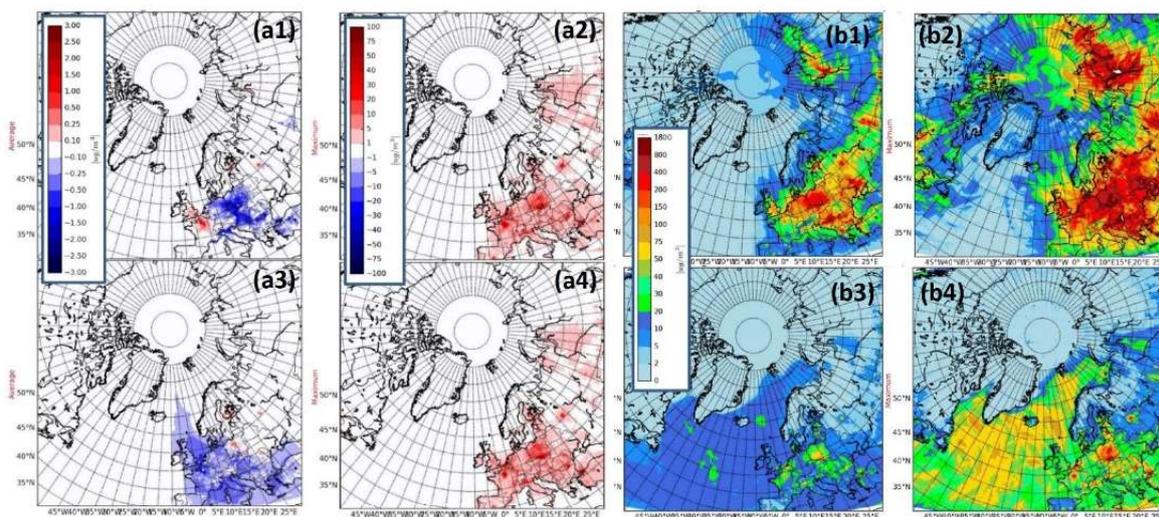


Figure 2: Enviro-HIRLAM: (a) Difference fields between CTRL&DAE (a1,a2) and CTRL&IDAE (a3,a4) model runs for monthly (January) averaged (a1,a3) and maximum (a2,a4) concentration of black carbon, BC (in µg/m³); (b) January (12 UTC) monthly averaged (b1,b3) and maximum (b2,b4) simulated concentration (in µg/m³) of SO₂ (b1,b2) and PM_{2.5} (b3,b4) for control run.

In winter, the differences between runs are less pronounced for average concentration in the Arctic regions compared with other regions (Fig2-a1,a2); but these differences are observed for max concentration, and especially for the Siberia and Ural regions of Russia (Fig. 2-a4). The average sulphur dioxide monthly concentration is larger over mid-latitudes (presence of anthropogenic sources), but maximum is also observed due to long-range atmospheric transport (Fig. 2-b1,b2). The average particular matter concentration is lower in the Arctic compared with mid-latitudes, but their composition is dominated by sea salt aerosols (Fig 2-b3,b4).

For operational forecasting, the Enviro-HIRLAM model was also setup for China with downscaling operational service with forecasting performed at resolutions of 15, 5 and 2.5 km (for the Shanghai metropolitan area), which is also the area of the PEEEX programme research interests.

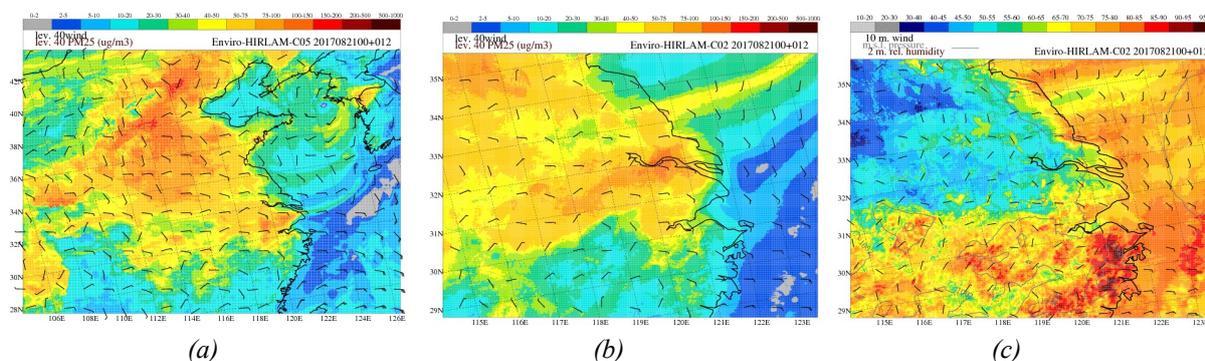


Figure 3: Example: Enviro-HIRLAM operational forecast (21 Aug 2017 00UTC+12 hour forecast length) for the Eastern China (at 5 km resolution) (a) PM_{2.5} concentration & for Shanghai metropolitan area for (b) PM_{2.5} concentration and (c) rel. humidity at 2m (incl. plotted wind speed and mean sea level pressure).

The model was used to study formation and development of meteorological and chemical (with focus on aerosols) fields on regional-subregional-urban scales for the larger part of the most populated territories of China. Such service (as set of models runs twice per day at 00 & 12 UTCs for 48 h forecast length) provides forecasts for particulate matter PM10 and PM2.5, air temperature, relative humidity, wind speed and direction, and mean sea level pressure. Simultaneous meteorological output can be used for better interpretation of air quality results (see Fig. 3).

Educational component

Moreover, science education component (as part of the PEEEX Educational Platform) for the INAR models is also realized, and in particular, through organization and carrying out of the research training weeks. The latest trainings took place in April 2019 (Helsinki; Enviro-PEEX project) and June 2019 (Tyumen, Russia; AoF ClimEco project). The 2020 trainings (postponed due to covid19) planned to be carried out in April (St.Petersburg, FIRST+ PEEEX-AC project; <https://www.atm.helsinki.fi/peex/index.php/education/16-courses/184-april-2020-peex-ac-research-training-intensive-course>) and August (Moscow, ClimEco & MegaCity projects; <https://www.atm.helsinki.fi/peex/index.php/education/16-courses/185-jul-aug-2020-young-scientist-summer-school-on-multi-scales-and-processes-integrated-modelling-observations-and-assessment-for-environmental-applications>) in Russia.

Concluding remarks

The models are planned to be further continued developed and applied as part of the Enviro-PEEX on ECMWF HPC (“*Pan-Eurasian EXperiment (PEEX) Modelling Platform research and development for online coupled integrated meteorology-chemistry-aerosols feedbacks and interactions in weather, climate and atmospheric composition multi-scale modelling*”) & CSC (“Enviro-HIRLAM seamless modelling of meteorology-chemistry-aerosols interactions and feedbacks on multi-scales”) projects as well as other ongoing/planned Horizon-2020, FP9, Nordic, AoF, etc. research projects and applied for different research tasks according to the PEEEX Science Plan [3]. The emphasis continued to be on evaluation and testing of the online integrated approach for in-depth sensitivity analyses of mechanisms, relationships, feedbacks, interactions, etc. between chemistry-aerosols and meteorology and assessment studies in a changing climate. Moreover, science education component (as part of the PEEEX Educational Platform) for the Enviro-HIRLAM model is also realised, and in particular, through organization and carrying out of the research training weeks. Due to recent CSC’s upgrade to new HPC system, the Enviro-HIRLAM model migrated to new platform and computing environment (i.e. instead of using Sisu’s CRAY XC based, the Puhti/Mahti’s Atos BullSequana are used) as well as new data storage (Allas).

Acknowledgements

Thanks to the Centre for Scientific Computing (CSC; www.csc.fi/csc) for technical support and advice. The CSC and ECMWF supercomputing facilities (CRAY-XC40) were used as part of the CSC and Enviro-PEEX projects. The ECMWF boundary conditions, meteorological and air quality observations/datasets were used for application, validation and verification of the models. The work was supported by Enviro-PEEX on ECMWF; EGAPOLI, MarcoPolo, AoF ClimEco; AoF Center of Excellence programme, CoE-ATM; and others projects.

References

1. Baklanov, A., Smith Korsholm, U., Nuterman, R., Mahura, A., Nielsen, K.P., Sass, B.H., Rasmussen, A., Zakey, A., Kaas, E., Kurganskiy, A., Sørensen, B., and González-Aparicio, I. (2017): Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2971-2999.
2. P. Uden, L. Rontu, H. Järvinen, P. Lynch, J. Calvo, G. Cats, J. Cuhart, K. Eerola, etc. (2002): HIRLAM-5 Scientific Documentation. Dec 2002, HIRLAM-5 Project Report, SMHI.
3. PEEEX (2015): Pan-Eurasian Experiment, PEEEX Science Plan. Eds. H.K. Lappalainen, M. Kulmala, S. Zilitinkevich. ISBN 978-951-51-0587-5, ISBN 978-951-51-0588-2 (on-line), 307p, www.atm.helsinki.fi/peex/images/PEEX_SP__27052015.pdf

Морозова С.В.* , Алимбиева М.А.

Оценка вклада углекислого газа в наблюдаемые климатические изменения статистическими методами

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский университет имени Н.Г.Чернышевского»
Россия, 420012, г. Саратов, Астраханская ул., 83
*E-mail: swetwl@yandex.ru

В настоящей статье проводится оценка вклада содержания углекислого газа в происходящее потепление методом дисперсионного анализа. На основе анализа скорости роста приповерхностной температуры воздуха предлагается к наблюдаемому климатическому процессу применять термин «разгоняющееся» потепление. Оценка вклада концентрации углекислого газа составила 87%. В то же время рост самой температуры приземного воздуха приводит к высвобождению углекислого газа из природных источников. Влияние роста температур на концентрацию углекислого газа в атмосфере показало статистическую значимость и оценивается в 19%. Ускоряющийся рост приповерхностной температуры воздуха предлагается рассматривать как положительную обратную связь, реализация которой вызвана антропогенным фактором.

Ключевые слова: земная климатическая система, концентрация углекислого газа, климатическая изменчивость, глобальное потепление, дисперсионный анализ.

Svetlana V. Morozova* , Mariya A. Alimpieva

Estimation of the contribution of carbon dioxide to observed climate change by statistical methods

Saratov State University
Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya Street, 83
*E-mail: swetwl@yandex.ru

This article assesses the contribution of carbon dioxide content to ongoing warming method of dispersive analysis. Based on the analysis of the growth rate of near-surface air temperature, it is proposed to apply the term “accelerating” warming to the observed climatic process. Assessment of the contribution of carbon dioxide concentration was 87%. At the same time, an increase in the surface air temperature itself leads to the release of carbon dioxide from natural sources. The influence of temperature increases on the concentration of carbon dioxide in the atmosphere showed statistical significance and is estimated at 19%. The accelerating increase in near-surface air temperature is proposed to be considered as positive feedback, the implementation of which is caused by the anthropogenic factor.

Keywords: earth climate system, carbon dioxide concentration, climate variability, global warming, dispersive analysis.

Введение

Земная климатическая система (ЗКС) представляет собой открытую неравновесную термодинамическую систему, управляемую и внешними процессами, и внутренними нелинейными взаимодействиями между ее составляющими. Современное состояние земной климатической системы расценивается как потепление [1]. Скорость роста глобально осредненной приповерхностной температуры воздуха на разных временных интервалах показывает следующие значения: 0,075 °C/10 лет за период 1901–2012 гг.; 0,17 °C/10 лет с 1976 года по 2012 год; 0,18 °C/10 лет – за 1976–2019 годы. Приведенные цифры свидетельствуют о все ускоряющемся темпе роста приповерхностной температуры воздуха, что позволяет применить к наблюдаемому климатическому процессу термин «разгоняющееся потепление».

Главной причиной, определяющей этот процесс, называется увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере [1, 2]. Однако, на фоне ускоряющегося роста глобальной приповерхностной температуры наблюдаются временные промежутки с замедлением темпа потепления, или же периоды преобладания отрицательных аномалий температуры [3, 4]. Безусловно, сложная временная ритмика

природных циклических колебаний определяется естественными причинами. Поэтому представляет интерес оценить вклад в наблюдаемую климатическую изменчивость парникового эффекта, вызываемого, в первую очередь, углекислым газом, и естественных факторов, которые чаще всего действуют в противовес наблюдаемым тенденциям, что и явилось целью настоящей работы.

Материалы и методы

Исходными материалами для выполнения исследования послужили данные о содержании углекислого газа в атмосфере, взятые с сайта (<https://climate.copernicus.eu/>) и аномалии приповерхностной температуры воздуха по данным Университета Восточной Англии, сайт (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/#datdow>). Исследования проводились на временном интервале 1980–2018 гг.

Для решения поставленной задачи применялись статистические методы. Укажем, что общепринятая точка зрения по обозначенной такова, что подобную оценку можно сделать только с помощью гидродинамического моделирования. По мнению авторов настоящей статьи оценку вклада углекислого газа в наблюдаемый рост температур можно провести статистическими методами, применив прием дисперсионного анализа. Достоинство дисперсионного анализа заключается в том, что можно довольно просто оценить значимость влияния одной величины на изменчивость другой, а также второй величины на первую.

Суть дисперсионного анализа заключается в сравнении «факторной» дисперсии, порождаемой воздействием фактора, и «остаточной» дисперсии, обусловленной другими причинами. Если различие между этими дисперсиями значимо, то фактор оказывает существенное влияние на исследуемую величину [5].

Основным приемом дисперсионного анализа является расчет общей σ_x , факторной σ_f и остаточной дисперсий σ_z . На практике иногда вместо дисперсий рассчитывают суммы квадратов отклонений: S_x - общую сумму квадратов, S_f - факторную сумму квадратов, S_z - остаточную сумму квадратов [5].

В настоящей статье для расчетов были использованы следующие формулы (1–3). Соответствующие суммы квадратов находились по формулам 1 и 2, дисперсии рассчитывались по выражениям (3).

$$S_z = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2; \quad (1)$$

$$S_f = \sum_{j=1}^q \frac{\sum_{i=1}^{m_j} (x_i)^2}{m_j} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2; \quad (2)$$

$$\sigma_f^2 = \frac{S_f}{K_f}, \sigma_z^2 = \frac{S_z}{K_z}, \sigma_x^2 = \frac{S_x}{K_x}, \quad (3),$$

При этом $K_f = q - 1$, $K_z = K_x - K_f$, $K_x = N - 1$ – числа степеней свободы,

q – число уровней (градаций) исследуемого фактора;

N – число наблюдений.

В настоящем исследовании использовался однофакторный дисперсионный анализ.

Результаты

Прежде чем рассматривать степень влияния CO_2 на рост температуры, рассчитаем коэффициент корреляции между этими величинами. Значения коэффициента корреляции оказалось равным $0,911 \pm 0,03$, что подтверждает тесную линейную взаимосвязь между концентрацией углекислого газа в атмосфере и приземной температурой воздуха.

Поскольку исследуется влияние углекислого газа на изменения приземной температуры воздуха, то процедуру разбиения на градации применяем для значений концентрации CO_2 . Для разбиения на градации применим стандартную статистическую процедуру:

- 1) по формуле $k = 5 \ln N$ определяем количество градаций;
- 2) по формуле $l = (x_{\max} - x_{\min})/k$ определяем ширину градации [6].

В соответствии с границами интервалов распределяются значения аномалий температуры воздуха. В табл. 1 приведено статистическое распределение аномалий температуры воздуха в зависимости от значения концентрации углекислого газа (m_i - абсолютная частота интервала).

На основании данных таблицы 1 были рассчитаны общие, факторные и остаточные дисперсии и суммы квадратов. Общая сумма квадратов (S_x) оказалась равной 3,587, факторная сумма квадратов (S_f) - 3,121. Остаточная сумма квадратов соответственно - 0,466. Используя значения факторной и остаточной дисперсий, рассчитаем их отношение ($\sigma_f^2 / \sigma_z^2 = 6,697$). Сравнение полученной величины с критерием Фишера ($F_{кр.} = 3,01$ при 5% -ном уровне значимости) позволило отвергнуть нулевую гипотезу о равенстве факторной и остаточной дисперсий. Следовательно, влияние выбранного фактора (концентрация углекислого газа) на исследуемую величину (приповерхностная температура воздуха) значимо.

Таблица 1

Распределение аномалий приповерхностной температуры воздуха в зависимости от концентрации углекислого газа

Статистические характеристики	Градации CO ₂						
	338,8 - 349,8	349,8 - 360,8	360,8- 371,7	371,7- 382,7	382,7- 393,7	393,7 - 404,7	404,7- 415,7
m_i	9	9	7	7	5	4	2
S_f	0,75	0,74	0,50	0,13	0,17	0,50	0,33

Определим существенность влияния (вклад) изучаемого фактора на приземную температуру, рассчитав отношение факторной и общей сумм квадратов: $S_f / S_x = 0,87$. Таким образом, заключаем, что вклад углекислого газа в изменения приповерхностной температуры воздуха составляет 87 %, следовательно, остальные 13 % изменчивости определяются влиянием естественных факторов. Полученный вывод о преобладании вклада парниковой составляющей, способствующей ускорению роста приповерхностной температуры воздуха, над вкладом естественной составляющей климатической изменчивости может послужить косвенным указанием на нарушение климато-экологического равновесия в земной климатической системе.

Отметим, что, если в восьмидесятых – девяностых годах прошлого века рост концентрации углекислого газа связывали исключительно со сжиганием ископаемого топлива [2] и влияние углекислого газа расценивали как исключительно антропогенный фактор, то современная точка зрения на это несколько изменилась. В связи глобальным потеплением и таянием многолетней мерзлоты, а также с повышением температуры поверхности океана, в атмосферу активно поступает углекислый газ из этих природных источников. По современным оценкам [1] количество углекислого газа, поступающего из природных источников, соизмеримо с его количеством антропогенного происхождения. В связи с этим оказывается интересным оценить влияние роста приземной температуры воздуха на увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере.

Для решения обозначенной задачи также применим методику дисперсионного анализа, причем уже в качестве исследуемой величины возьмем углекислый газ, а в качестве фактора, влияющего на его концентрацию, приповерхностную температуру воздуха. Статистическое распределение приведено зависимости концентрации углекислого газа от температуры воздуха приведено в табл. 2.

Таблица 2

Распределение концентрации углекислого газа в зависимости от аномалий приповерхностной температуры воздуха

Статистические характеристики	Градации аномалий температуры, °С						
	-0,57 - (- 0,38)	-0,38 - (- 0,19)	-0,19–0,0	0,0–0,19	0,0 - 0,38	0,38– 0,57	0,57– 0,76
m_i	5	10	3	10	8	1	2
S_f	44,59	842,30	9,32	1243,20	842,50	0	5,92

По данным табл. 2, как и в предыдущем случае, рассчитаны общие, факторные и остаточные дисперсии и суммы квадратов. Общая сумма квадратов (S_x) оказалась равной 15745,06, факторная сумма квадратов (S_f) - 2987,82. Остаточная сумма квадратов соответственно - 12757,24. Используя значения

факторной и остаточной дисперсий, рассчитаем их отношение ($\sigma_f^2 / \sigma_z^2 = 5,96$). Сравнение полученной величины с критерием Фишера ($F_{кр.} = 3,85$ при 5 % -ном уровне значимости) позволило отвергнуть нулевую гипотезу о равенстве факторной и остаточной дисперсий. Следовательно, влияние роста температуры приземного слоя воздуха на увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере оказалось статистически значимым. По отношению факторной и общей суммы квадратов ($S_f / S_x = 5,76$) вклад роста приповерхностной температуры воздуха в увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере составляет 19 %.

Укажем, что действия природных факторов в земной климатической системе чаще всего реализуются по механизму отрицательной обратной связи. Отрицательные обратные связи препятствуют выходу системы из состояния равновесия. В настоящем случае увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере в результате повышения температуры поверхностного слоя океана с дегазацией CO_2 и оттаивания карбонат-гидратов происходит из-за роста приземной температуры воздуха. Этот процесс можно рассматривать как положительную обратную связь, усиливающую первоначальное воздействие и стремящуюся вывести систему из состояния равновесия. Обычно такой процесс приводит к переходу системы в качественно новое состояние [7]. В качестве первоначального воздействия выступает рост содержания углекислого газа в атмосфере, вызванный ростом ископаемого топлива (антропогенный фактор).

В настоящее время можно заметить некоторые «нехарактерные» для земной климатической системы процессы. Например, в публикациях [8, 9] указывается на увеличение повторяемости вторжения Арктических антициклонов на юго-восток Европейской части России летом и уменьшение числа их вторжений зимой. В связи с более частым поступлением арктических антициклонов летом на континент существенно возрастает роль трансформационного фактора. В связи с этим можно ожидать, что при дальнейшем развитии потепления вклад летних сезонов в этот процесс окажется более значимым. Если принять во внимание, что климатические изменения определяются, в основном, изменениями температур холодной части года, то увеличение вклада летних сезонов в климатические процессы можно рассматривать как явление, также не характерное для земной климатической системы. Зимний сезон 2019–2020 гг. тоже не имеет себе аналогов за всю историю регулярных метеорологических наблюдений.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

- 1) В связи с постоянно увеличивающейся скоростью роста приповерхностной температуры воздуха к процессу, наблюдающемуся в земной климатической системе, можно применять термин «разгоняющееся потепление».
- 2) Разделение вклада факторов различной природы, действующих в земной климатической системе и влияющих на процессы, происходящие в ней, можно провести статистическими методами, в частности, с помощью дисперсионного анализа.
- 3) Вклад роста концентрации углекислого газа в процесс повышения приземной температуры воздуха оценивается в 87 %.
- 4) Рост приповерхностной температуры воздуха, приводящий потеплению поверхности океана и оттаиванию карбонат-гидратов, статистически значимо влияет на концентрацию углекислого газа в атмосфере. Вклад повышения температуры в увеличение концентрации углекислого газа оценивается в 19 %.
- 5) Процесс разгоняющегося потепления можно рассматривать как положительную обратную связь, действующую в земной климатической системе, действие которой вызвано антропогенным фактором.
- 6) В земной климатической системе развиваются процессы, для нее не характерные, в частности, аномально теплый зимний сезон 2019–2020 гг. не имеет себе аналогов в эпоху регулярных метеорологических наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. In: Solomon, S., et al. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, New York.
3. Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов. Изд-во СГУ. 2019. 132 с.
4. BBC. News. Русская служба. URL: <https://www.bbc.com/russian/features-51590071> (дата обращения 04.03.2020).
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во Высшая школа, 2003. 480 с.
6. Наумова Л.П. О выделении детерминированных составляющих случайного процесса // Труды ГГО. 1977. Вып.390. С.83–85.
7. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат. 1980. 351 с.
8. Завьялова Е.В., Морозова С.В., Полянская Е.А. Синоптические процессы в Нижнем Поволжье и климатическая изменчивость // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий. Материалы Международной научно-практической конференции. Челябинск, 26–28 сентября 2018 г. – Челябинск: «Край Ра», 2018. С.11–18.
9. Morozova S.V. et al. Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental. 2018. Volume 107.2018. P. 1–8.

Намгаладзе А.А.

Землетрясения и верхняя атмосфера; теория и наблюдения

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мурманский арктический государственный университет»

Россия, 183038, Мурманск, ул. Егорова, 15

E-mail: namgaladze@yandex.ru

Рассмотрены теоретические основы связи между землетрясениями и верхней атмосферой Земли и наблюдения данной связи, обсуждены возможности прогнозирования землетрясений на этой базе. Рассмотрены возможные физические механизмы генерации сейсмогенных электрических полей и их передачи от очага землетрясения в ионосферу на высоты F2-слоя, где плазма замагничена и подвержена действию электромагнитного дрейфа. Вертикальный перенос ионосферной плазмы этим дрейфом вызывает положительные и отрицательные возмущения полного электронного содержания (ПЭС). По виду и расположению этих возмущений можно судить об ионосферных предвестниках землетрясений. Существующие глобальные сети приёмников радиосигналов от геостационарных спутников являются наблюдательной базой для поиска таких предвестников. Количественное описание наблюдаемых вариаций ПЭС базируется на глобальных трёхмерных численных моделях околоземной среды.

Ключевые слова: землетрясения, верхняя атмосфера, полное электронное содержание, геостационарные спутники, электромагнитный дрейф плазмы, аэрозоли.

Aleksandr A. Namgaladze

Earthquakes and upper atmosphere; theory and observations

Murmansk Arctic State University

Russia, 183038, Murmansk, Egorova Str., 15

E-mail: namgaladze@yandex.ru

The theoretical foundations of the relationship between EQs and the upper atmosphere and observations of this relationship are considered together with possibilities of predicting EQs. Physical mechanisms for generating seismogenic electric fields and transmitting them from the EQ source to the ionosphere at the F2 layer heights, where the plasma is magnetized and electromagnetic drift exists, are considered. The vertical transfer of ionosphere plasma by this drift causes positive and negative disturbances of the total electron content. By the type and location of these disturbances, we can judge the ionosphere precursors of EQ. Existing global networks of receivers of radio signals from geostationary satellites are an observation base for searching for such precursors. The quantitative description of the observed TEC variations is based on the global 3D numerical models of the near-earth environment.

Keywords: earthquakes, upper atmosphere, total electron content, geopositioning satellites, electromagnetic plasma drift, aerosols.

Введение

Землетрясения (ЗТ) являются самыми грандиозными природными катаклизмами, уносящими жизни десятков и сотен тысяч людей и приводящими к опустошительным инфраструктурным разрушениям. Они связаны с накоплением и последующим ударным выделением энергии от сжатия тектонических плит. Актуальность прогнозирования ЗТ не вызывает никаких сомнений, однако задача их предсказания далека от решения, что связано с локальностью источников, которыми являются подвижки тектонических плит вдоль их разломов, а также с ограниченностью средств наблюдений, расположенных зачастую в недоступных для населения местах.

Теория физических процессов, развивающихся в окрестностях эпицентров ЗТ, долгое время оставалась полукачественной как из-за сложного химического состава приземной атмосферы и среды внутри трещин, так и в силу недостаточности данных наблюдений. К этому следует также добавить недоступность сложного трёхмерного математического моделирования околоземной среды для широкой научной общественности, требующего наличия высокопроизводительной компьютерной техники и сочетания геофизики с программированием.

Три обстоятельства последних десятилетий сыграли важную роль для прогресса в направлении прогноза ЗТ. Первое – появление мощных настольных вычислительных средств наряду с известными суперкомпьютерами и соответствующее развитие математического моделирования. Второе – появление спутниковых систем наблюдения с повышенным разрешением за такими параметрами околоземной среды как полное электронное содержание (ПЭС), электронная концентрация, инфракрасное излучение, облачность и т.п. Третье – проведение экспериментов по сдавливанию скальных пород с изменениями их кристаллической и электрической структуры.

Ниже мы рассмотрим физические обоснования связи ЗТ с вариациями верхней атмосферы, методы наблюдения и математического моделирования этих вариаций, а также полученные результаты.

Физические основы связи землетрясений с вариациями параметров околоземной среды

Теория

В этой главе мы будем придерживаться преимущественно монографии Б.Е. Брюнелли и А.А. Намгаладзе "Физика ионосферы" [1], в которой рассмотрены физические процессы, протекающие не только в собственно ионосфере, но и в связанных с ней нейтральной атмосфере, плазмасфере, магнитосфере и солнечном ветре.

Основное воздействие ЗТ на околоземную среду с выделением большого количества энергии осуществляется в виде удара, главного толчка взрывного характера. Этот удар генерирует в приземной атмосфере волны, именуемые обычно акустико-гравитационными волнами (АГВ). На частотах в первые десятки килогерц они являются обычными звуковыми волнами, а на меньших частотах (ниже частоты Брандта-Вяйсаяля) они принимают вид так называемых внутренних гравитационных волн (ВГВ), в которых возрастает влияние силы тяжести и появляются помимо продольных поперечные (относительно направления распространения) колебания среды. Распространение ВГВ вверх в среде с экспоненциально убывающей плотностью приводит к нарастанию амплитуды возмущения скорости газа для обеспечения сохранности кинетической энергии. Взаимодействие ВГВ с заряженными частицами создаёт перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые распространяются со скоростями порядка нескольких сот метров в сек. Такие волновые возмущения аналогичны многим хорошо изученным взрывам в атмосфере, включая ядерные, но их разрушительное воздействие проявляется уже после того, как землетрясение произошло. Для предсказания собственно главного удара необходимо изучение стадии подготовки ЗТ, когда идёт накопление энергии сжатия, высвобождающейся впоследствии. Такое изучение осуществлялось многократно путём анализа данных наблюдений, выполненных перед (обычно в течение нескольких дней до главного толчка) уже произошедшими землетрясениями в окрестностях их эпицентров.

Наблюдения событий в околоземной среде, предвещающих землетрясения

Наличие обширной мировой сети станций геомагнитных и ионосферных обсерваторий, дополненных спутниковыми наблюдениями, создало возможность изучения отклика околоземной среды на готовящиеся землетрясения. Особенно эффективными в этом плане явились изучения вариаций полного электронного содержания ионосферы (ПЭС), поставляемые в Интернет глобальными сетями геопозиционных спутников ГПС и ГЛОНАСС [2], дополненные данными спутников Интеркосмос Болгария, Деметер, Чамп и других [3].

Эти наблюдения недвусмысленно показали существование ионосферных предвестников землетрясений в виде вариаций критических частот главного ионосферного максимума и пропорциональных им вариаций ПЭС над эпицентрами ЗТ и рядом с ними, достигающих величин в несколько десятков процентов [4]. При этом наблюдалась магнитная сопряжённость и малая подвижность возмущённых областей относительно эпицентров.

Интерпретация этих данных наблюдений долгое время оставалась качественной. Из-за магнитной сопряжённости (электрической эквипотенциальности геомагнитных силовых линий) и влияния на экваториальную ионосферную аномалию она основывалась преимущественно на сейсмогенном электрическом поле, однако природа этого электрического поля была невыясненной, как и сам механизм его воздействия на ионосферную плазму.

Математическое моделирование сейсмогенных возмущений околоземной среды

Современное математическое моделирование физических процессов является преимущественно численным. Применительно к околоземному космосу оно базируется на решении системы физических уравнений для многокомпонентной газовой среды, находящейся во внешних гравитационных и магнитных полях, с источниками за пределами этой среды – Солнцем, Луной, галактиками и недрами Земли.

Физические уравнения для такой среды подробно рассмотрены в [1], как и возможные начальные и граничные условия для них. Там же описаны и методы численного решения этих уравнений, наиболее распространённым из которых является метод конечных разностей.

Применительно к сейсмогенным возмущениям околоземной среды глобальное трёхмерное моделирование возмущений верхней атмосферы Земли впервые было проведено в 2009-м году [5] с использованием модели ГСМТИП [6], модифицированной в последующем до версии UAM [7]. Обе модели рассчитывают в казигидродинамическом (пятимоментном) приближении физические параметры основных нейтральных и заряженных компонент околоземной плазмы на высотах от 60–80 км до 100000 км. Геомагнитное поле аппроксимируется диполем с осью, не совпадающей с осью вращения Земли (географической осью). В систему уравнений входит уравнение для электрического потенциала с магнитосферными (от зон продольных токов 1 и 2) и сейсмогенными (на нижней границе) источниками.

С помощью названных моделей в поисках предвестников сильных землетрясений было проведено много численных расчётов параметров околоземной среды для преимущественно спокойных геомагнитных условий перед разнообразными землетрясениями в различных широтных и долготных зонах и в различные сезоны [8]. Эти расчёты сопоставлялись с данными наблюдений, главным образом, возмущений ПЭС, представленными в Интернете. Основным физическим фактором, ответственным за предвестники ЗТ, предполагалось сейсмогенное электрическое поле, однако его требуемые величины и механизмы генерации в приземной атмосфере с последующей передачей в верхнюю атмосферу до настоящего времени остаются предметом дискуссии.

В упомянутых работах результаты модельных расчётов ПЭС дают оценки требуемых величин сейсмогенного электрического поля в верхней атмосфере порядка 10 мВ/м, что сравнимо с величинами возмущений электрического поля от солнечных и магнитосферных источников в средних широтах, но соответствует специальным данным спутника Деметер, пролетавшего над областями повышенной сейсмичности.

Что касается возможности генерации такого поля вблизи земной поверхности и передачи его вверх через практически непроводящий диэлектрик, она рассматривалась в ряде работ [9–11], и это рассмотрение привело к ряду важных выводов. Во-первых, прямое проникновение электрического поля снизу невозможно по причине низкой проводимости нижней атмосферы. Во-вторых, закон Ома в его традиционной форме неприемлем в случае не подавления неэлектрических сил электрической. Токи, создаваемые этими неэлектрическими силами (типа градиентов давления, силы тяжести и т.п.), называются сторонними, как и вызываемые ими электрические поля. Наличие этих сторонних токов и электрических полей и разрешает проблему.

Существование заряженных аэрозолей в атмосфере способствует усилению сторонних токов из-за медленной рекомбинации этих частиц и попаданию вертикальных сейсмогенных электрических токов в области с высокой ионосферной проводимостью. Далее процесс передачи сейсмогенного электрического поля вверх не вызывает принципиальных теоретических трудностей. Это электрическое поле совместно с магнитным вызывает электромагнитный дрейф плазмы в F2-области ионосферы, а её вертикальные перемещения уменьшают или увеличивают ПЭС в зависимости от направления электрического поля.

Обсуждение

Влияние электромагнитного дрейфа на ПЭС является не единственным воздействием ЗТ на околоземную среду, просто возмущения ПЭС легче наблюдать из-за развитости сети приёмников геопозиционных спутников. Важны также обычные метеорологические спутниковые наблюдения облачности, которая формируется жидкими аэрозолями (каплями воды) и выстраивается вдоль тектонических разломов в районах усиленной эманации этих аэрозолей при подготовке ЗТ [12].

Наблюдения сверху микроволнового излучения [13] несут информацию о приземном тепле, выделяющемся при подготовке ЗТ. Они также являются средствами обнаружения предвестников ЗТ.

ОНЧ излучения от движений и трений обломков сталкивающихся тектонических плит [14] и от вариаций диэлектрической проницаемости околоземной плазмы, вызываемых вариациями ПЭС, продолжают оставаться в ранге предвестников ЗТ [15].

Главной проблемой прогнозирования ЗТ по данным об их предвестниках является недостаточный охват возможных предвестников этими данными в недоступных районах типа океанов, тайги, джунглей. К счастью, в Китае, Японии и Юго-Восточной Азии, где население густо населяет области тектонических разломов, а также в Южной Европе и соседних областях сеть наблюдательных пунктов продолжает расширяться.

Заклучение

В настоящее время существуют физические предпосылки для прогнозирования землетрясений на основе их воздействия на околоземную среду, в первую очередь на атмосферу Земли посредством эманации в неё газов из тектонических трещин. Эти газы ионизируются над эпицентрами как галактическими космическими лучами, так и выбросами радиоактивных частиц, прежде всего радона. Ионизированные частицы слипаются с партнёрами по столкновениям, образуя более крупные заряженные аэрозоли, которые рекомбинируют медленнее и живут дольше. Электрический ток, несомый этими частицами, движется вверх под действием преимущественно неэлектрических сил (градиентов давления, гравитации, столкновений и т.п.), то есть он является не омическим, а сторонним, и лишь достигая высот нижней ионосферы, куда проникает солнечное излучение, превращается в омический с доминированием электрической силы над неэлектрическими.

На высотах области F2, где частота ион-нейтральных столкновений меньше ионной гирочастоты, плазма замагничена, а силовые линии геомагнитного поля электрически эквипотенциальны. На этих высотах электрон-ионные пары свободно движутся вдоль геомагнитного поля, а поперёк него они дрейфуют под действием скрещенных электрического и магнитного полей. Направленное к востоку электрическое поле опускает плазму в область повышенных ионно-молекулярных потерь и уменьшает её концентрацию, западное поле вызывает противоположный эффект. Это и есть ионосферные эффекты землетрясений, вызываемые на стадии их подготовки, если электрическое поле имеет сейсмогенное происхождение. Их существование сегодня не вызывает сомнений, хотя на пути прогнозирования ЗТ имеются ещё немалые препятствия, упомянутые выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Е. Брунелли, А.А. Намгалдзе. Физика ионосферы. М., Наука. 1988, 526 с.
2. Dow, J.M., Neilan, R.E., Rizos, C.// The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. of Geodesy*, 2009, 191–198. doi:10.1007/s00190-008-0300-3.
3. Parrot, M., Special issue of Planetary and Space Science ‘DEMETER’, // *Planet. Space Sci.* 2006. 54, 5, 411–412, DOI: 10.1016/j.pss.2005.10.012.
4. Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I., Krankowski, A., and Lagovsky A.F. // Ionospheric precursors observed during the mediterranean region earthquakes. *Proceedings of the 18th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility 2006*, 85–90.
5. Namgaladze, A.A., Klimenko, M.V., Klimenko, V.V., and Zakharenkova I.E. // Physical mechanism and mathematical modeling of earthquake ionospheric precursors registered in Total Electron Content ISSN 0016_7932, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, Vol. 49, No. 2, pp. 252–262. © Pleiades Publishing, Ltd., 2009. Original Russian Text © A.A. Namgaladze, M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, I.E. Zakharenkova, 2009, published in *Geomagnetizm i Aeronomiya*, 2009, Vol. 49, No. 2, pp. 267–277.
6. Namgaladze, A.A., Korenkov, Yu.N., Klimenko, V.V., Karpov, I.V., Bessarab, F.S., Surotkin, V.A., Glushchenko, T.A., Naumova, N.M. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. // *Pure and Applied Geophysics* 1988, Volume 127, 219–254.
7. Namgaladze, A.A., Knyazeva, M.A., Karpov, M.I., Zolotov, O.V., Martynenko, O.V., Yurik, R.Y., Foerster M., Prokhorov, B.E. The global numerical model of the earth’s upper atmosphere. // *In Numerical Simulations in Engineering and Science 2018*. <https://doi.org/doi:10.5772/intechopen.71139>
8. Namgaladze, A.A.; Förster, M.; Prokhorov, B.E.; Zolotov, O.V. *Electromagnetic Drivers in the Upper Atmosphere: Observations and Modeling*. Springer. 2013, 165–219.
9. Denisenko, V.V. Estimate for the Strength of the Electric Field Penetrating from the Earth’s Surface to the Ionosphere. // *Russ. J. Phys. Chem.* 2015. Volume B. 9, 789–795. doi: 10.1134/S199079311505019X.
10. S199079311505019X. Namgaladze, A.A., Karpov, M.I., Knyazeva, M.A. // Aerosols and seismo-ionosphere coupling: a review. *JASTP*. 2018, doi:10.1016/j.jastp.2018.01.014.
11. Sorokin, V.M., Hayakawa, M. Generation of seismic-related DC electric fields and lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling. *Modern Applied Science* 2013, Volume 7, 1–25. doi:10.5539/mas.v7n6p1.
12. Morozova, L.I. Crustal geodynamic activity: manifestations in cloud fields. // *Russ. Geol. Geophys.* 2012. Volume 53, 416–423. doi: 10.1016/j.rgg.2012.02.014.
13. Tramutoli, V., Aliano, C., Corrado, R., Filizzola, C., Genzano, N., Lisi, M., Martinelli G., Pergola, N. On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST). // *Chemical Geology*. 2013. V. 339. P. 157–168. doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.10.042.

14. Kachakhidze, M., Kachakhidze, N., Kaladze, T. // Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling System 2014. Universal, Tbilisi.
15. Molchanov, O.A., Hayakawa, M. Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results. TERRAPUB, Tokyo. 2008. 189 pp.

**Неробелов Г.М.^{1,2*}, Седеева М.С.^{1,3}, Махура А.Г.⁴, Нутерман Р.Б.⁵,
Смышляев С.П.⁶**

**Enviro-HIRLAM моделирование переноса атмосферных загрязнителей
и воздействия аэрозолей на метеорологические параметры
над северо-западной частью России и Северной Европой**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук, Лаборатория дистанционных методов геоэкологического мониторинга и геоинформатики, Корпусная ул., д. 18, г. Санкт-Петербург, 197110, Россия

*E-mail: akulishe95@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Физический факультет, кафедра физики атмосферы Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9

⁴Institute for Atmospheric and Earth System Research (INAR) / Physics, Faculty of Science, University of Helsinki (UHEL)
Kumpula campus, Gustaf Hallstrominkatu 2a, FI-00560, Хельсинки, Финляндия

⁵Niels Bohr Institute (NBI), University of Copenhagen (UCPH),
Juliane Maries Vej 30, DK-2100, Копенгаген, Дания

⁶Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», кафедра метеорологических прогнозов Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79

В исследовании оценивается влияние аэрозольных частиц на ряд метеорологических параметров (температура воздуха на 2 м, облачность, массовая доля водяного пара, осадки), а также пространственно-временное распределение SO₂ и влажностное выпадение сульфатов на поверхности водных объектов. Исследование проводится для января и августа 2010 года по результатам расчёта онлайн-интегрированной модели гидродинамического прогноза погоды и переноса атмосферной химии Enviro-HIRLAM (Environment - High Resolution Limited Area Model). В работе рассматриваются территории северо-западной части России, стран Северной Европы, Кольского полуострова и трех крупных городов – Санкт-Петербург, Москва (Россия) и Хельсинки (Финляндия). Было выполнено 4 запуска модели: контрольный (без аэрозольного влияния), с учетом прямого, косвенного и смешанного влияния аэрозолей.

Анализ результатов моделирования показал, что влияние аэрозолей проявляется сильнее в августе, чем в январе 2010 года. Прямое воздействие в основном приводит к уменьшению температуры воздуха и облачности, а косвенное и смешанное увеличивают эти параметры. Прямое воздействие уменьшает массовую долю водяного пара в январе и увеличивает в августе. Косвенное и смешанное увеличивали данный параметр в январе, но уменьшали в августе. Все три аэрозольных эффекта приводили к уменьшению количества осадков. Оценка для трех городов показала, что в августе влияние аэрозолей выражено сильнее, чем в январе. Изменения метеорологических параметров наиболее заметно в Санкт-Петербурге и в Москве в августе, а в январе – в Хельсинки.

Анализ результатов моделирования концентрации SO₂ показал, что количество случаев трансграничного переноса этого загрязнителя с территории Кольского полуострова на территорию стран Северной Европы выше в августе 2010 года, чем в январе (15 и 9 дней соответственно). По результатам моделирования в январе, по сравнению с августом, наблюдался более частый вынос SO₂ (20 и 5 дней соответственно) на территорию Баренцева, Норвежского и Белого морей, а также более высокие концентрации на территориях Кольского полуострова и стран Северной Европы. Количество случаев влажностного выпадения, как и количество самих выпавших сульфатов, оказалось выше в августе.

Ключевые слова: влияние аэрозолей, перенос SO₂, влажностное выпадение, Enviro-HIRLAM, онлайн-интегрированное моделирование, Северо-Запад России, Фенноскандия.

**Georgy M. Nerobelov^{1,2*}, Margarita S. Sedeeva^{1,3}, Alexander G. Mahura⁴,
Roman B. Nuterman⁵, Smyshlyaev P. Sergei⁶**

**Enviro-HIRLAM modelling of atmospheric pollution transport
and aerosol effects on meteorological parameters
over territories of North-West Russia and Northern Europe**

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences,
Laboratory for Remote Sensing Methods of Geoecological Monitoring and Geoinformatics,
18, Korpusnaya st., St. Petersburg, 197110, Russia

*E-mail: akulishe95@mail.ru

²Saint-Petersburg State University,
Faculty of Physics, Department of Atmospheric Physics
Russia, 199034, Saint-Petersburg, Universitetskaya Naberegnaya, 7-9

³Saint-Petersburg State University,
Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics
Russia, 199034, Saint-Petersburg, Universitetskaya Naberegnaya, 7-9

⁴Institute for Atmospheric and Earth System Research (INAR) / Physics, Faculty of Science,
University of Helsinki (UHEL)
Helsinki, Finland

⁵Niels Bohr Institute (NBI), University of Copenhagen (UCPH)
Juliane Maries Vej 30, DK-2100, Copenhagen, Denmark

⁶Russian State Hydrometeorological University (RSHU),
Department of Meteorological Forecasting
Russia, 192007, Saint-Petersburg, Voronezhskaya St., 79

In this study the aerosol influence on meteorological parameters (air temperature at 2 m, total cloud cover, specific humidity, precipitation) as well as spatio-temporal variations of SO₂ and sulphates wet deposition on surfaces of water bodies are evaluated. The research was carried out for January and August of 2010 using results of online-integrated numerical weather prediction and atmospheric chemistry transport model Enviro-HIRLAM. The territories of interest are North-West Russia, countries of Northern Europe, Kola Peninsula and three large cities – Saint-Petersburg, Moscow (Russia) and Helsinki (Finland). Four model runs were performed: reference run (without aerosol effects included), run with direct, indirect and combined aerosol effects.

Analysis of the modelled results demonstrates that aerosol effects were more significant during August 2010 than during January. In general, the direct effect led to decrease air temperature and total cloud cover, when the indirect and combined effects tend to increase these parameters. In addition, the direct effect decreased specific humidity in January and August. The indirect and combined effects increased this parameter in January and decreased in August. All three aerosol effects led to decrease in precipitation. It was found that the aerosol effects for the selected cities were more significant in August than in January. The considerable changes in meteorological parameters were found in Saint-Petersburg and Moscow during August and in Helsinki during January.

The analysis of modeled SO₂ concentration demonstrated the larger number of cases of transboundary pollution from the territory of the Kola Peninsula to the territory of the Northern Europe in August 2010 than in January (15 and 9 days respectively). According to the modelled results, SO₂ was transported to the territories of water bodies (Barents, Norwegian and White Seas) more frequently in January than in August (20 vs 5 days respectively). In addition, SO₂ concentrations over the Kola Peninsula and the territory of the Northern Europe countries were higher in January. The number of cases of wet deposition as well as amount of deposited sulphates were higher in August.

Keywords: aerosol feedbacks, transport of SO₂, wet deposition, Enviro-HIRLAM, online-integrated modelling, North-West Russia, Fennoscandia.

Введение

Уровень урбанизации, увеличивающийся в последние десятилетия [1], приводит к росту количества выбрасываемых в атмосферу аэрозольных и газовых частиц, которые образуются в результате процессов сжигания ископаемого топлива, а также работы промышленных предприятий [2, 3]. Газовые частицы, в зависимости от своей токсичности, могут приводить к неблагоприятным последствиям, изменяя качество воздуха, и таким образом усложняя дыхательный процесс живых существ. Аэрозольные частицы, например, сульфаты, способны изменять кислотность пресных водоемов, пагубно влияя на флору и фауну, или разрушая лесные экосистемы в результате выпадения [4, 5, 6]. Серосодержащие вещества, находящиеся в атмосфере в виде газа (диоксид серы SO₂) и аэрозольных частиц (сульфаты), относят к одному из основных антропогенных загрязнителей. Более того, некоторые аэрозольные частицы (например, сажа, морская соль и др.) способны влиять на электромагнитную радиацию различных длин волн и на состояние облачности, таким образом, воздействуя на ряд метеорологических параметров (например, на температуру воздуха) [7]. Современные исследования показали, что из-за относительно длительного времени жизни SO₂ в атмосфере (от 15 до 65 ч), имеет место проблема трансграничного переноса загрязнителя с территории одной страны на территории стран-соседей [8]. Примером может служить перенос диоксида серы с горно-металлургических комплексов, расположенных на Кольском полуострове (Россия), на территории Норвегии, Финляндии и Швеции (нет прямой границы). Однако, нерегулярная сеть наблюдений за концентрацией SO₂ усложняет представление пространственно-временной вариации этого загрязнителя в атмосфере. Здесь на помощь может прийти моделирование переноса атмосферных примесей, которое интенсивно развивалось и развивается в последние годы [9, 10]. Некоторые современные модели гидродинамического прогноза погоды и атмосферного переноса атмосферной химии имеют возможность рассчитывать изменение характеристик аэрозольных частиц (например, их радиус и количество) под действием метеорологических полей с последующим учетом влияния измененных аэрозольных характеристик на метеорологические поля (так называемая «обратная связь»). Целью исследования является анализ и оценка влияния аэрозольных частиц на ряд метеорологических параметров на территории Северо-Запада России и Финляндии с фокусом на крупные города, а также оценка загрязнения окружающей среды территорий Мурманской области (Россия) и стран Северной Европы выбросами диоксида серы с промышленных предприятий Кольского полуострова на основе результатов моделирования.

Методология исследования

Для исследования влияния аэрозолей на метеорологические параметры (температура воздуха на 2 м, облачность, массовая доля водяного пара и осадки) была выбрана территория Северо-Запада России, где расположено большое количество промышленных предприятий. Отдельно рассматривались территории двух крупнейших промышленных центров России – г. Москва и Санкт-Петербург, а также столица Финляндии – г. Хельсинки. При исследовании пространственно-временного изменения концентрации SO₂ и влажностного выпадения сульфатов на территории водных объектов была выбрана территория Кольского полуострова и три ближайших к ней страны – Финляндия, Норвегия и Швеция. За временной период исследования были выбраны два контрастирующих с точки зрения метеорологии месяца - январь и август 2010 года. В течение этих периодов наблюдалась благоприятная для исследования метеорологическая ситуация – слабая скорость ветра и умеренное количество осадков. В работе использовалась онлайн-интегрированная гидродинамическая модель прогноза погоды и переноса атмосферной химии Enviro-HIRLAM (Environment - High Resolution Limited Area Model). Именно одновременный расчет метеорологических и химических параметров, а также возможность обмена информацией между метеорологическим и химическим блоками модели, позволяет точнее учитывать

влияние изменения аэрозолей на метеорологические параметры. Для данного исследования использовалась следующая конфигурация модели: пространственное разрешение – 0.15°, вертикальное разрешение – 40 гибридных уровней (от 1013 до 10 гПа), временной шаг – 360 с, период ассимиляции начальных условий – каждые 6 ч, заблаговременность прогноза – 3 и 6 ч. Для исследования проводилось 4 запуска модели – контрольный (без влияния аэрозолей), запуск с прямым (ПВА – прямое влияние аэрозолей), косвенным (КВА – косвенное влияние аэрозолей) и смешанным (ПВА+КВА) влиянием аэрозолей. Для анализа результатов использовались различные инструменты пространственного представления и обработки информации, в том числе и ГИС (геоинформационная система) QuantumGIS, которая предоставляет широкий ряд возможностей для обработки различной информации.

Основные результаты и заключение

Согласно анализу результатов моделирования, влияние аэрозолей оказалось более выраженным в августе 2010 года. На части исследуемых территорий ПВА приводил к уменьшению температуры воздуха (до 14°C в августе, до 6°C в январе) и изменению облачности (до 100%). КВА и ПВА+КВА в основном увеличивали данные параметры (до 6–10°C и до 100% в августе и январе соответственно). ПВА чаще всего уменьшал массовую долю водяного пара в январе (до 1 г/кг), но увеличивал в августе (до 10 г/кг). КВА и ПВА+КВА наоборот – увеличивали данный параметр в январе (до 2 г/кг), но уменьшали в августе (до 4–12 г/кг). Все три аэрозольных эффекта приводили к уменьшению количества осадков (от 2 до 20 мм в августе, от 0.6 до 2.5 мм в январе). Оценка результатов моделирования для трех городов показала, что влияние аэрозольных частиц в августе было выражено гораздо сильнее, чем в январе. Изменения метеорологических параметров было наиболее заметно в Санкт-Петербурге и в Москве в течение августа. В январе наибольшим изменением параметров выделился Хельсинки.

Анализ модельных полей пространственно-временной вариации SO₂ показал, что количество случаев трансграничного переноса этого загрязнителя с территории Кольского полуострова на территорию стран Северной Европы было выше почти в два раза в августе 2010 года, чем в январе (15 и 9 дней соответственно). За весь период исследования наблюдалось 13 случаев превышения максимально-разовой предельно допустимой концентрации (ПДК_{мр}) SO₂. В январе по результатам моделирования наблюдалось примерно 20 случаев (и 5 в августе) выноса SO₂ на территорию ближайших крупных водных акваторий (Баренцева, Норвежского и Белого морей). Более того, концентрации на территориях Кольского полуострова и стран Северной Европы были также выше в январе. Количество случаев влажностного выпадения, как и количество самих выпавших сульфатов, было выше в августе года, что связано с большим количеством случаев выпадения осадков в течение этого периода.

В завершении можно сказать, что результаты моделирования влияния аэрозолей на метеорологические параметры демонстрируют достаточно большую разницу между результатами модельных расчетов с учетом и без учета этого влияния. Особенно такая разница велика в летний период, тогда как в зимний, отличия были гораздо меньше. Что касается переноса SO₂ и выпадения сульфатов, то результаты моделирования демонстрируют возможность рассчитывать пространственно-временную изменчивость загрязнителей, что особенно необходимо при наличии сложностей с налаженной системы комплексного мониторинга качества воздуха. Тем не менее для прикладного использования результатов моделирования требуется дальнейшее сопоставление этих результатов с данными наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-05-01050.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тенденции: урбанизация // Geography Look [Электронный ресурс]: <http://www.grandars.ru/shkola/bezopasnostzhiznedeyatelnosti/urbanizaciya.html> (дата обращения: 30.03.2019).
2. Nancy A. Marley и Jeffrey S. Gaffney, Introduction to Urban Aerosols and Their Impacts, Introduction to Urban Aerosols and Their Impacts, 2005, № 19, гл.1, с. 2–22.
3. Popescu F., Ionel I., Anthropogenic air pollution sources // Air Quality, ok Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-307-131-2, InTech, London, United Kingdom, 2010.
4. Natural or anthropogenic? On the origin of atmospheric sulfate deposition in the Andes of south eastern Ecuador // Atmospheric Chemistry and Physics [Электронный ресурс]. - <https://www.atmos-chem-phys.net/14/11297/2014/acp-14-11297-2014.pdf> (дата обращения: 05.04.2020).

5. Health & Environmental Effects of Air Pollution // Commonwealth of Massachusetts [Электронный ресурс]. - <https://www.mass.gov/files/documents/2016/08/vl/health-and-env-effects-air-pollutions.pdf> (дата обращения: 14.03.2018).
6. Effects of Acid Rain - Surface Waters and Aquatic Animals // U.S. Environmental Protection Agency [Электронный ресурс]. - https://landuse.alberta.ca/Forms%20and%20Applications/RFR_ACFN%20Reply%20to%20Crown%20Submission%205%20-118%20TabD9%20AcidRain_2014-08_PUBLIC.pdf (дата обращения: 14.03.2018).
7. Л. Ивлев, Ю. Довгалоук. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.
8. Lee, C., R.V. Martin, A. van Donkelaar, H. Lee, R. R. Dickerson, J.C. Hains, N. Krotkov, A. Richter, K. Vinnikov, and J. J. Schwab (2011), SO₂ emissions and lifetimes: Estimates from inverse modeling using in situ and global, space-based (SCIAMACHY and OMI) observations, *J. Geophys. Res.*, 116, D06304, doi:10.1029/2010JD014758.
9. Baklanov, A., Smith Korsholm, U., Nuterman, R., Mahura, A., Nielsen, K.P., Sass, B.H., Rasmussen, A., Zakey, A., Kaas, E., Kurganskiy, A., Sørensen, B., and González-Aparicio, I.: Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2971-2999, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>, 2017.
10. Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W., & Eder, B. (2005). Fully-coupled online chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39, 6957–6975. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.04.027

**Панькин Д.В.², Колесников И.Е.², Васильева А.А.², Пилип А.Г.¹,
Зигель В.В.^{1*}, Маньшина А.А.², Агаева Т.³**

**Применение метода спектроскопии комбинационного рассеяния
в экологическом анализе**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук, Корпусная ул., д. 18, г. Санкт-Петербург, 197110, Россия
*E-mail: V_zigel@mail.ru

²Институт химии, Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский проспект, дом 26

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна»
Россия, 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18В

В данной работе показана возможность определения некоторых цианотоксинов и других поллютантов с помощью ГКР-спектроскопии в концентрациях на уровне ПДК. Возможность однозначного обнаружения и идентификации токсинов была продемонстрирована также для сложных смесей различных токсинов на основе контроля групп характерных пиков, которые можно рассматривать как отпечатки комбинационного рассеяния экотоксикантов.

Ключевые слова: оловоорганические соединения, рамановская спектроскопия, идентификация токсинов, природные нейротоксины, характеристические пики.

**Dmitrii Pankin², Ilya Kolesnikov², Anna Vasilieva², Anna Pilip¹,
Vladislav Zigel^{1*}, Alina Manshina², Tous Agayeva³**

The use of Raman spectroscopy in environmental analysis

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences,
18, Korpusnaya st., St. Petersburg, 197110, Russia
*E-mail: V_zigel@mail.ru

² Institute of Chemistry, Saint Petersburg State University,
Universitetskii pr. 26, St. Petersburg, Russian Federation

³ Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design
Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya street, 18 Russian Federation

In this work, the possibility of determining certain cyanotoxins and other pollutants using Raman spectroscopy at concentrations at the MPC level is shown. The ability to unambiguously detect and identify toxins has also been demonstrated for complex mixtures of various toxins based on the control of groups of characteristic peaks, which can be considered as Raman prints of ecotoxicants.

Keywords: Organotin compounds, Raman spectroscopy, toxin identification, natural neurotoxins, characteristic peaks.

В настоящее время важной проблемой экологической безопасности является недостаточное число высокочувствительных экспрессных методов детектирования биотоксичных веществ сложной природы, таких как фосфорорганические и карбаматные пестициды, токсичные оловоорганические соединения, природные токсиканты, в частности, токсины цианобактерий (микроцистины и анатоксины). Поэтому создание полевого портативного автоматизированного сенсора на основе спектрометра комбинационного рассеяния является актуальной задачей.

В последние годы для анализа поллютантов активно используется разновидность колебательной спектроскопии, основанная на явлениях гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР). Суть этого явления состоит в огромном (до 10^5 — 10^8 раз) увеличении сечения КР молекулами, адсорбированными на поверхности металла. Вследствие этого ГКР-спектры удается регистрировать при концентрациях, на несколько порядков меньших, чем в обычной спектроскопии КР. В основе явления ГКР лежат два механизма: электромагнитный, связанный с увеличением локального электромагнитного поля вблизи поверхности, и молекулярный, связанный с образованием возбужденных состояний комплексов молекул с металлом. Для регистрации спектров используется та же аппаратура, что и для получения обычных КР-спектров. Для возбуждения применяют лазерное излучение видимого диапазона, мощность которого обычно не превышает нескольких милливатт.

Спектроскопия ГКР теоретически позволяет прямое определение всех аналитов, однако практическая идентификация желаемых токсинов в присутствии нетоксичных химических компонентов в водной матрице может требовать определенной пробоподготовки. Дополнительным фактором, влияющим на получаемые результаты и возможности их практического применения, являются характеристики спектрометра, на котором осуществляется регистрация спектров КР. Применение для полевых скрининговых измерений переносных КР спектрометров требует тестирования на модельных образцах получаемых КР спектров при различных параметрах измерений: разрешение, плотность мощности, длина волны возбуждения и т.д.

В данной работе в качестве наноподложек использовались золото-серебряные углеродные гибридные наночастицы. Для их получения применяли метод лазерно-индуцированного осаждения. Суть его состоит в следующем: непрерывное лазерное излучение воздействует на границу раздела между раствором металлорганического комплекса и подложкой, на которую производится осаждение. В результате этого воздействия происходит фотоиндуцированное разложение комплекса с формированием различных типов наноструктур на поверхности подложки. В качестве подложек использовались покровные стекла без напыления либо с напылением пленки кристаллического оксида индия-олова. Осаждение ГКР-активных наноструктур проводилось из раствора гетерополиядерного металлорганического комплекса с формулой $[\{Au_{10}Ag_{12}(C_2Ph)_{20}\}Au_3(PPh_2(C_6H_4)_3PPh_2)_3][PF_6]_5$ [1]. Структура данного комплекса представлена на рисунке 1.

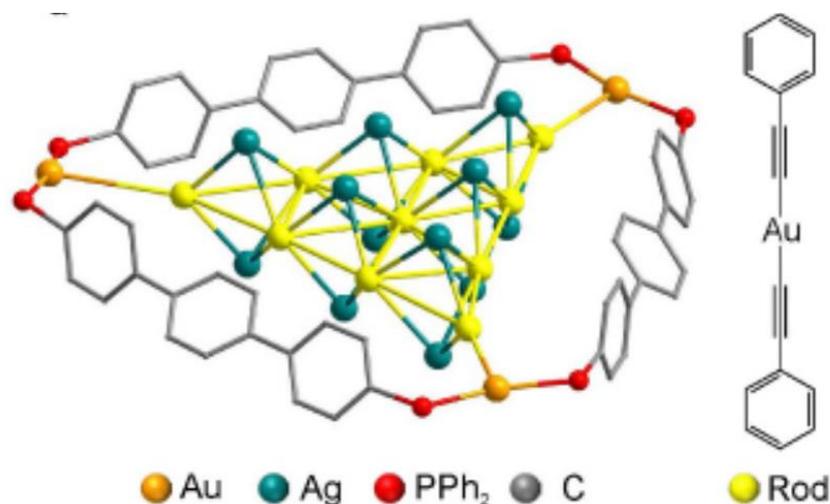


Рис. 1. Структура металлорганического комплекса [1]

В результате лазерно-индуцированного синтеза образуются слои наночастиц с различным пространственным строением, коэффициент усиления полученных наноструктур составляет 10^5 — 10^8 . Измерения спектров ГКР осуществлялись на приборе Senterra (Bruker): длина волны лазера 532 нм [1].

В данной работе показана возможность определения некоторых цианотоксинов и других поллютантов с помощью ГКР-спектроскопии в концентрациях на уровне ПДК.

Одной из проблем экологии является глобальное распространение вредоносных цветений водорослей, которое связано с постоянно нарастающей эвтрофикацией внутренних водоёмов. Это приводит к массовому развитию водорослей и к появлению в природной воде, а иногда и в питьевой, целой группы сильнодействующих токсинов – микроцистинов, таких, как LR и RR, анатоксин-а, анатоксин-а(s). Для обнаружения продуктов метаболизма цианобактерий в природной матрице были изучены образцы

биомассы сине-зеленых водорослей, собранные в Финском заливе в районе п. Репино в период массового цветения, а также илистые осадки донных отложений Невской губы Финского залива.

Среди исследованных веществ были рассмотрены следующие природные и антропогенные токсины:

- микроцистин LR (MC LR),
- анатоксин-а (Ana-a)
- оловоорганические соединения различного состава
- перфтороктансульфоновая кислота (PFOS)
- фосфорорганические соединения

На рисунке 2 представлены нормированные спектры КРС исследованных биотоксичных соединений.

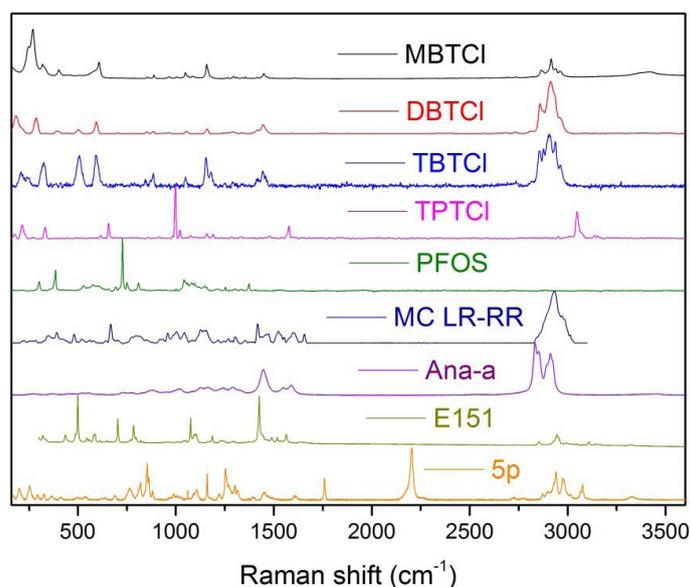


Рис. 2. Спектры КРС экотоксичных соединений

Полученные результаты позволили выявить характеристические колебательные частоты, присущие каждому из изученных токсинов, что является необходимым условием для создания системы детектирования и идентификации биотоксичных соединений разной природы.

На рисунке 3 представлен спектр КР водного раствора микроцистина-LR, полученный от стандартного образца с концентрацией около 0,05 мг/мл. Полученные пики с их интерпретацией приведены в таблице 1. Для надежного соотнесения выбирались полосы, положения которых в спектрах КР совпадают с литературными данными в пределах 5 см^{-1} . В качестве таких линий были выбраны следующие пики: 826, 964, 1006, 1083, 1224, 1305, 1485, 1650 см^{-1} . Так же в качестве контрольной полосы была выбрана широкая полоса в диапазоне 2088–3000 см^{-1} , которая интерпретируется как полоса, составленная из пиков валентных колебаний в связях C-H в метильных и метиленовых группах, то есть колебания атомов водорода при углероде с sp^3 гибридизацией. Регистрация пиков в диапазоне 2800–3000 см^{-1} , хотя и не является полноценным доказательством регистрации именно микроцистина-LR, но является одним из первых индикаторов факта сорбирования микроцистина на ГКР подложке.

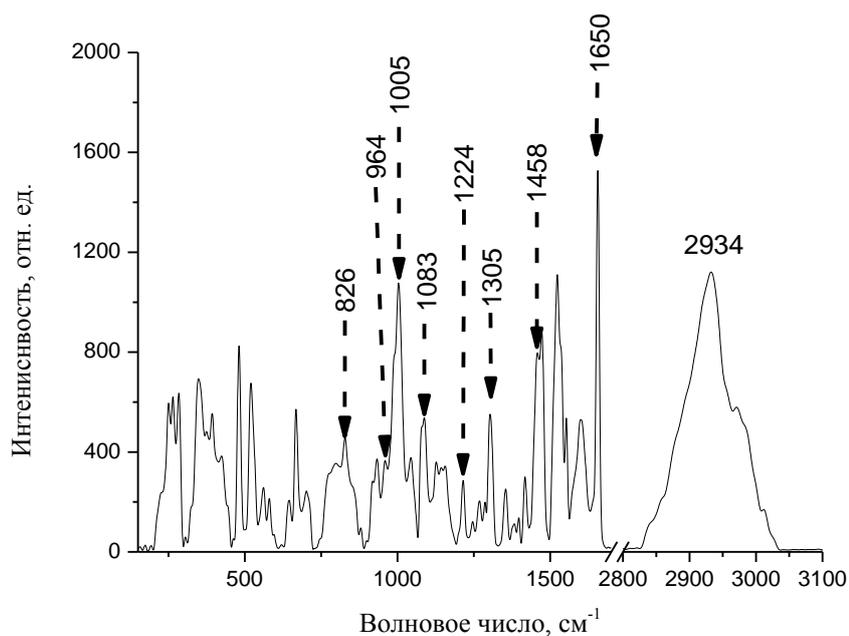


Рис. 3. Спектр КРС водного раствора микроцистина-LR. Стрелками указаны положения характеристических линий

В полученном спектре КРС в качестве характеристических полос были выбраны колебания, относящиеся к следующим функциональным группам – CH_2 и CH_3 (1305, 1458, 2800–3000 cm^{-1}), карбоксильной группы (1650 cm^{-1}), фенильного кольца (в качестве дополнительных 822, 1006 cm^{-1}), а так же некоторые пики в области скелетных колебаний и колебаний с одинарными связями (960, 1086 cm^{-1}). Все вышеперечисленные функциональные группы есть в составе микроцистина-LR.

Таблица 1

Интерпретация пиков в спектре КР водного раствора микроцистина-LR

Положение характеристических линий в спектре, cm^{-1}	Интерпретация полосы
822	внеплоскостные колебания в фенильном кольце связей C-H
960	колебания со сложными атомными смещениями, включающими валентные колебания в связях C-C, деформационные колебания в CCH
1006	дышащее колебание в фенильном кольце
1086	валентные колебания в связях C-C
1224	колебания в фенильном кольце
1309	колебания со сложными атомными смещениями, включающими веерные, маятниковые и деформационные атомные движения водорода в группах CH_2 , CH_3
1452	H-C-H деформационные колебания
1654	валентные колебания в группе COO
2930	валентные колебания в связях C-H

На рисунке 4 приведен спектр ГКР водного раствора микроцистина-LR ($5 \cdot 10^{-5}$ мг/мл), измеренного на ГКР-активной платформе с наночастицами. В спектрах ГКР наблюдалось изменение

соотношения интенсивностей ряда пиков, а так же небольшой сдвиг в положении пиков по сравнению со спектрами КР. Было установлено, что данный сдвиг не превышает 5 см^{-1} по сравнению с аналогичными пиками в спектре КР микроцистина-LR.

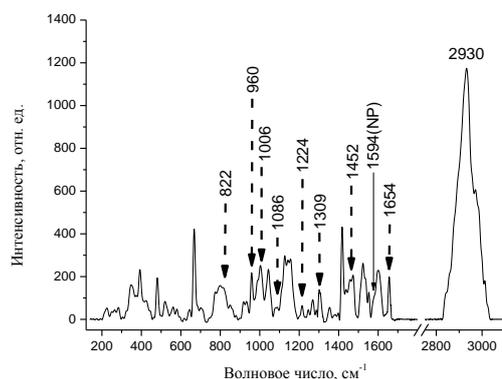


Рис. 4. Спектр ГКР водного раствора микроцистин-LR с концентрацией $5 \cdot 10^{-5}$ мг/мл (приведен спектр с после вычитания базовой линии) Стрелками указаны положения характеристических линий

Анатоксин-а – низкомолекулярный алкалоид (165 Да). Синтезируется разными видами из родов *Anabaena*, *Planktothrix*, *Aphanizomenon* и *Cylindrospermopsis*. ЛД₅₀ анатоксина-а – $200\text{--}250\text{ мкг} \cdot \text{кг}^{-1}$. Анатоксин-а не ингибирует холинэстеразу. Он имитирует действие ацетилхолина и способен сверхстимулировать мышечные клетки, что вызывает мышечное истощение, судороги, конвульсии и удушье. Противоядия анатоксину-а не существует. Структурная формула анатоксина-а представлена на рисунке 5. Детектируют анатоксин-а преимущественно методом HPLS/MS

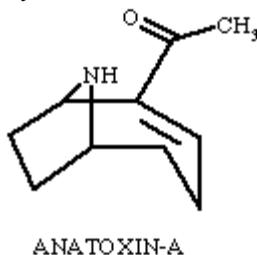


Рис. 5. Структурная формула анатоксина-а

Нормированный спектр КР водного раствора анатоксина-а с концентрацией $0,01\text{ мг/мл}$ показан на рисунке 6.

В литературе отсутствуют данные оптических спектров данного вещества.

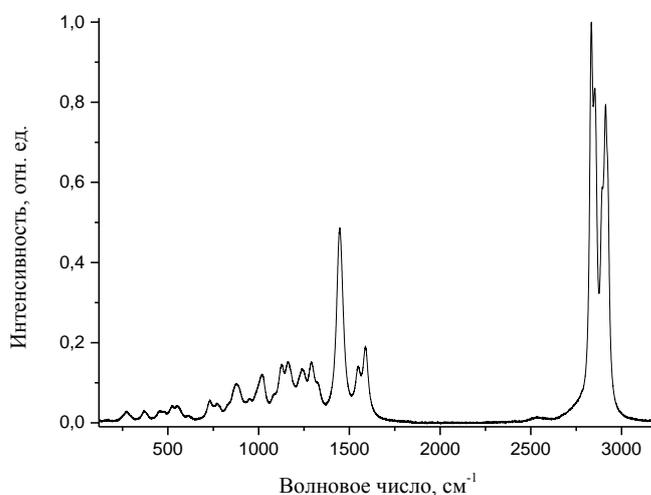


Рис. 6. Нормированный спектр КРС водного раствора анатоксина-а

Для идентификации анатоксина-а были выбраны следующие характерные пики: 615, 771, 882, 1128, 1240, 1284, 1456, 2835, 2853, 2925 см^{-1} . Среди приведенных полос присутствуют пики, характеризующие как структурный каркас из одиночных связей С-С, С-N (615, 771, 882, 1128), так и колебания в таких функциональных группах как CH_2 и CH_3 (1128, 1240, 1284, 1457, 2833, 2855, 2922 см^{-1}). Интерпретация отобранных пиков была проведена на основании строения молекулы анатоксина-а и возможных колебаний для соответствующих функциональных групп. Пики, относящиеся к данным колебаниям, относительно интенсивны и различимы в спектре КР, в то же время они не пересекаются с пиками остатков комплекса (из которого синтезируются наночастицы).

Таблица 2

Интерпретация пиков в спектре КР водного раствора анатоксина-а

Положение характеристических линий в спектре, см^{-1}	Интерпретация полосы
615	валентные колебания в связях С-С, С-N
771	валентные колебания в связях С-С, С-N
882	валентные колебания в связях С-С, С-N
1128	сложное колебание, которое может включать как валентные колебания в связях С-С и С-N, так и веерные колебания водородов в CH_2 группах
1240	сложное колебание с участием водородов с доминирующим вкладом веерного колебания, так же возможен вклад от маятникового колебания в CH_2 группах
1284	сложное колебание с участием водородов доминирующим вкладом является веерное колебания, так же возможен вклад от маятникового колебания в CH_2 группах
1457	деформационное колебание Н-С-Н
2833	валентное колебание С-Н
2855	валентное колебание С-Н
2922	валентное колебание С-Н

На рисунке 7 приведен спектр ГКР водного раствора анатоксина-а (10^{-5} мг/мл), измеренного на ГКР-активной платформе с наночастицами. Кроме того, на этом же рисунке приведен КРС спектр водного раствора анатоксина-а большей концентрации (0,01 мг/мл) и КР спектр ГКР-активной платформы. В спектрах ГКР анатоксина-а наблюдалось перераспределение соотношения интенсивностей в области валентных колебаний связей С-С, С-N, веерных и маятниковых колебаний водородов относительно атомов углерода (с относительным ростом интенсивности данных типов линий). Это может говорить о преимущественном упорядочении углеродного скелета молекулы анатоксина-а на поверхности синтезированных ГКР платформ.

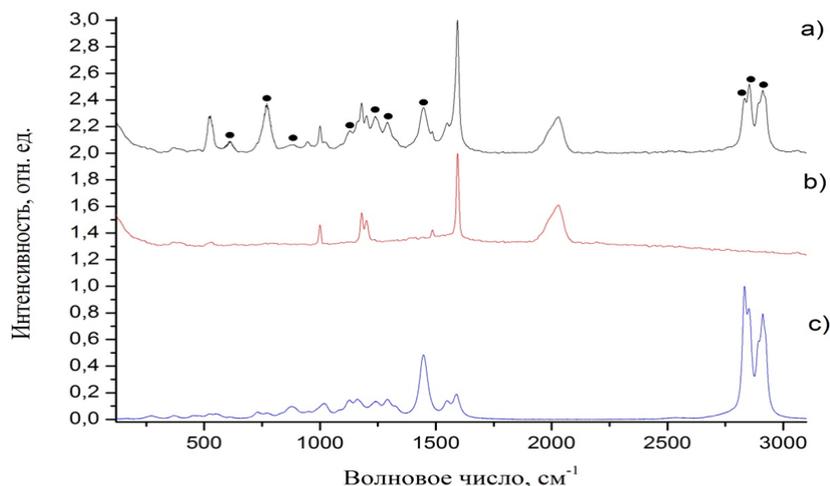


Рис. 7. (а) Нормированный спектр ГКР водного раствора анатоксина-а на ГКР платформе, (б) спектр ГКР-активной платформы, (с) нормированный спектр КРС водного раствора анатоксина-а

Таким образом, показано, что методом гигантского комбинационного рассеяния возможно оперативно и с минимальной пробоподготовкой детектировать цианотоксины в концентрациях ниже 1мкг/л.

После измерения спектров КР различных токсинов, были исследованы спектры оловосодержащих токсинов на ГКР-подложках. Так как коэффициент усиления составляет около 10^5 для тестирования приготовленных подложек были выбраны растворы с концентрациями токсина 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} мг/мл. На примере оловоорганических соединений показано, что в спектрах ГКР токсин ТРТС1 идентифицировался по характерным колебаниям олово-углерод и олово-хлор. Это связано с тем, что положения пиков, соответствующие колебаниям в фенильных кольцах токсина частично перекрываются с пиками остатков комплекса. В получаемых спектрах ГКР было отмечено изменение соотношения интенсивностей полос по сравнению с исходными не усиленными спектрами токсинов. Так в частности в диапазоне $1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ было отмечено резкое усиление слабоинтенсивных мод. Таким образом, для уверенной идентификации исследуемых токсинов с помощью спектроскопии ГКР, необходимо проводить предварительные измерения спектров КР чистых токсинов с целью выделения пиков и серии пиков, однозначно соответствующих тому или иному токсину. Полученные на данном этапе работы ГКР спектры токсинов позволяют определять концентрации оловоорганических соединений до нескольких мкг/л [2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-03-01284 А - Гибридные металл/углеродные наноструктуры для детектирования биотоксичных веществ сложной природы в экологическом мониторинге.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.A. Manshina, E.V. Grachova, A.V. Povolotskiy, A.V. Povolotckaia, Y.V. Petrov, I.O. Koshevoy, A.A. Makarova, D.V. Vyalikh, S.P. Tunik. Laser-induced transformation of supramolecular complexes: approach to controlled formation of hybrid multi-yolk-shell Au-Ag@a-C:H nanostructures// Scientific Reports, 2015, 5, 12027.
2. Dmitrii Pankin, Iliya Kolesnikov, Anna Vasilieva, Anna Pilip, Vladislav Zigel, Alina Manshina. Raman fingerprints for unambiguous identification of organotin compounds// Environmental Science and Pollution Research // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy (IF 2.88) 2018, 158–163.

Переведенцев Ю.П. *, Шанталинский К.М.

**Долгопериодные колебания климата
на территории Приволжского федерального округа**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Россия, 420008, Казань, Кремлевская ул., д. 18
*E-mail: Yuri.Perevedentsev@kpfu.ru

С использованием данных двенадцати длиннорядных станций за 1888–2018 гг. и 183 метеостанций за 1966–2018 гг. выявлены тенденции изменения температуры воздуха и атмосферных осадков. Показано, что в условиях современного потепления климата наблюдается заметное увеличение годовых сумм осадков в северной части округа. Анализ низкочастотных компонент температуры воздуха выявил продолжительность и интенсивность их однотипных колебаний на территории Приволжского федерального округа.

Ключевые слова: климат, низкочастотная компонента, корреляция, температура воздуха, циркуляция атмосферы.

Yuri P. Perevedentsev*, Konstantin M. Shantalinsky

Long-term climate fluctuations in the Volga Federal District

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan Federal University»
Russia, 420008, Kazan, Kremlin st., 18
*E-mail: Yuri.Perevedentsev@kpfu.ru

Using data from twelve stations for 1888–2018. and 183 stations for 1966–2018. trends in air temperature and precipitation are identified. It is shown that under conditions of modern climate warming, a noticeable increase in annual precipitation is observed in the northern part of the Volga Federal District. An analysis of the low-frequency components of air temperature revealed the duration and intensity of their homogeneous fluctuations in the District.

Keywords: climate, low-frequency component, correlation, air temperature, atmospheric circulation.

Проблема изменения современного климата по-прежнему остается одной из самых цитируемых как в научных кругах, так и в средствах массовой информации. В мире и в России регулярно публикуются обзоры о текущем состоянии климатической системы Земли, о наблюдаемых климатических аномалиях, рекордах и экстремальных погодных событиях [1]. Ни у кого не вызывает сомнений факт глобального потепления климата последних десятилетий, что подтверждается как наземными, так и космическими наблюдениями. Как отмечено в работах [2,3], главный вопрос заключается в поиске физических причин потепления и количественных оценок вкладов различных факторов в изменения глобального климата и тем более его прогноза с учетом антропогенных воздействий. Глобальные климатические события находят свой отклик на различных регионах Земли. В частности, климатические изменения на территории Среднего Поволжья активно изучаются климатологами Казанского университета начиная с 1812 г. с момента открытия в нем по инициативе профессора физики Ф.К. Броннера Метеорологической обсерватории (МО). Отдельные результаты этих исследований представлены в авторских работах [4–8].

Цель настоящей статьи рассмотреть климатические изменения на территории Приволжского федерального округа (ПФО) в XIX–XXI веках на фоне колебаний приповерхностной температуры воздуха (ТВ) осредненной по территории всего Северного полушария (СП). ПФО включает в себя Среднее Поволжье и Предуралье, природные и физико-географические условия которого рассмотрены в [9]. В качестве исходных данных использовались данные приземной ТВ по всему земному шару (1850–2018 гг.) университета Восточной Англии (CRU), реанализов (1948–2018 гг.), 12-ти долгопериодных станций на территории ПФО за 1888–2018 гг. и 183 метеостанций за 1966–2018 гг., кроме того, также рассматривались результаты многолетних наблюдений в МО Казанского университета в период 1828–2018 гг.

Многолетние ряды исходных данных подвергались статистической обработке, выделение низкочастотной компоненты (НЧК) для анализа долгопериодных колебаний температуры воздуха

осуществлялось с помощью низкочастотного фильтра Поттера с точкой отсечения 15 лет и более. Достоверность результатов оценивалась с помощью критерия Фишера.

Рассмотрим результаты статистической обработки метеорологических наблюдений, часть из которых представлена в виде рисунка и таблиц. В первую очередь следует отметить тот факт, что начиная с 1850 г. в исследуемом регионе как и в Северном полушарии в целом установилась общая тенденция роста средней годовой температуры воздуха (СГТВ). И если до середины 1970-х годов эти изменения СГТВ во времени носили колебательный характер, иногда противофазного характера, то в последние десятилетия отмечается однонаправленный рост температуры всего СП, суши СП и ПФО (рис. 1, табл. 1).

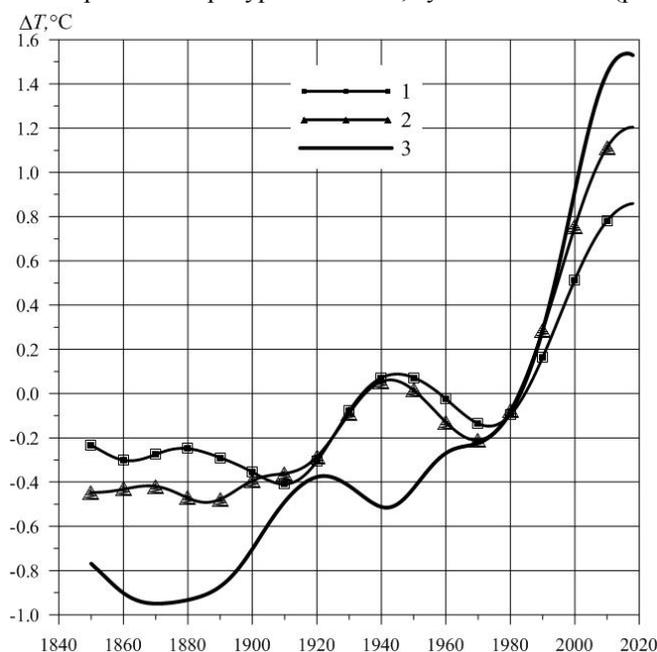


Рис. 1. НЧК с периодом более 25 лет аномалий осредненных по территории приземных СГТВ относительно норм 1961–1990 гг. 1 – Северное полушарие, 2 – суша Северного полушария, 3 – Приволжский федеральный округ

Данные рис. 1 позволяют проследить за изменениями низкочастотной компоненты с периодом более 25 лет СГТВ осредненной по территории ПФО, Северного полушария в целом и суши СП в период 1850–2018 гг. В табл. 1 также представлены сведения о колебаниях СГТВ в рассматриваемый период, из которой следует, что в заключительный продолжительный период (41-45 лет) повсеместно наблюдается наибольшее приращение СГТВ с максимальной скоростью. Так, в ПФО в период 1974–2015 гг. (41 год) температура воздуха повысилась на 1,22°C со скоростью 0,30°C/10 лет.

Ранее в нашей работе [6] была получена корреляционная связь между аномалией ТВ в ПФО и аномалией ТВ всего СП в период 1955–2009 гг. Для годовых температур коэффициент корреляции равен 0,59, для зимы 0,63 и лета 0,41, что свидетельствует о влиянии глобального фактора на региональный процесс потепления.

Этот факт хорошо проявляется по данным метеонаблюдений на ст. Казань, университет, где СГТВ с 1828 по 2018 г. повысилась примерно на 4°C, а в заключительный период 1970–2018 гг. наиболее интенсивного потепления СГТВ росла со скоростью 0,4°C/10 лет. При этом сравнение низкочастотных компонент с периодом более 25 лет аномалий СГТВ г. Казани и всего СП обнаруживает их заметное сходство. Различия заключаются в сдвигах фаз потепления. Так, в начале XX века потепление в Казани началось на 10 лет, а современное потепление (1970-х годов) на 15 лет раньше, чем в целом по СП.

Характеристики низкочастотных изменений СГТВ Северного полушария, суши Северного полушария и Приволжского федерального округа

Регион	Δt , годы	ΔT , °C	$\Delta T/\Delta t$, °C/10 лет
Северное полушарие	1850–1913 (63)	-0,50	-0,08
	1913–1941 (28)	0,32	0,12
	1941–1976 (35)	-0,41	-0,12
	1976–2018 (42)	0,78	0,19
Суша Северного полушария	1850–1892 (42)	-0,34	-0,08
	1892–1899 (7)	0,01	0,01
	1899–1916 (17)	-0,07	-0,04
	1916–1939 (23)	0,20	0,08
	1939–1973 (34)	-0,52	-0,15
Приволжский федеральный округ	1850–1891 (41)	-0,57	-0,14
	1891–1914 (23)	0,15	0,07
	1914–1946 (32)	-0,45	-0,14
	1946–1958 (12)	0,05	0,04
	1958–1974 (16)	-0,09	-0,06
	1974–2015 (41)	1,22	0,30
	2015–2018 (3)	-0,01	-0,04

Примечание: Δt – период монотонного изменения низкочастотной компоненты температуры (годы), ΔT – величина изменения температуры (°C), $\Delta T/\Delta t$ – скорость изменения температуры (°C/10 лет).

Сравнение временного хода нормированных аномалий СГТВ ($\Delta T/\Delta \sigma$) в период 1888–2018 гг. для ряда западных (Казань, Пенза, Саратов) и восточных станций (Пермь, Уфа, Оренбург) показывает, что если на западе переход от отрицательных значений аномалий к положительным произошел в 1965–1970 гг., то на востоке он растянулся с 1965 г. (ст. Оренбург) до 1980 г. (ст. Уфа), т.е. в западной части ПФО процесс потепления происходит более однородно по территории и интенсивнее, чем в восточной.

По атмосферным осадкам наиболее надежные данные приходятся на период 1966–2018 гг. (53 года). Обработка данных по 183 метеостанциям позволила получить средние величины, характеристики изменчивости сумм осадков и их тренды. В среднем по округу годовая сумма осадков составляет около 530 мм, наибольшее их количество выпадает в северной части (655 мм), а наименьшее на юго-востоке (274 мм). Линейные тренды годовых сумм осадков показывают, что они возрастают в северо-западной и северо-восточной частях ПФО (на ст. Ныроб до 30 мм/10 лет) и слабо меняются на юге, а на ст. Оренбург отмечается даже их уменьшение со скоростью -2,9 мм/10 лет.

Кривые сезонных низкочастотных компонент нормированных аномалий осадков ($\Delta P_t/\sigma_t$) носят колебательный характер. Так, начиная со второй половины 1970-х годов до 2018 г. интенсивность зимних осадков возрастает, летние осадки с 1980-х годов до 2009 г. уменьшались и лишь в последние годы стали вновь расти. Годовая сумма осадков с 2010 по 2018 гг. стала расти ($\Delta P_t/\sigma_t > 0$), что свидетельствует о росте атмосферных осадков и повышении увлажненности территории региона в целом.

Оценка корреляционных связей между ТВ и индексами атмосферной циркуляции АМО, NAO, АО, SCAND показала, что для периода декабрь–март коэффициенты корреляции имеют достаточно высокие значения. Так, коэффициент корреляции между ТВ и индексом NAO в декабре–марте достигает значения 0,47, в летний период связи не значимы.

Потепление в ПФО привело к следующим событиям: изменилась продолжительность вегетационного периода, весна стала наступать раньше, осень позже. Сумма положительных температур возрастает, а положительных аномалий ТВ стало больше, чем отрицательных. В то же время возрастает число опасных явлений погоды на территории ПФО.

В табл. 2 представлены характеристики низкочастотной изменчивости ТВ в период 1888–2018 гг. для 12 длиннорядных станций расположенных на всей территории ПФО.

Как видно из табл. 2, среднеянварская температура на территории ПФО понижается с юго-запада на северо-восток от -9,02 (ст. Урюпинск) до -16,31°C (ст. Бисер). СКО колеблется в пределах от 3,49 до 4,17°C. В июле многолетняя температура растет с севера на юг от 15,70°C (ст. Бисер) до 22,10°C (ст. Оренбург), величина СКО меняется в пределах 1,80–2,09°C.

В апреле и октябре многолетние среднемесячные температуры повсеместно положительны за исключением ст. Бисер, где среднеоктябрьская температура составляет $-0,89^{\circ}\text{C}$. В рассматриваемый период во все сезоны года отмечается положительная тенденция изменения температуры воздуха. При этом в январе наблюдается наибольшая скорость потепления (величина A изменяется от 0,13 (ст. Сыктывкар) до $0,34^{\circ}\text{C}/10$ лет (ст. Октябрьский городок). В июле величина тренда незначима. Данные табл. 2 свидетельствуют, что потепление происходит интенсивнее в зимне-весенний период и более заметно в центре и на юго-западе ПФО, чем на северо-востоке.

Таблица 2

Характеристики низкочастотной изменчивости температуры воздуха на территории ПФО в период 1888–2018 гг.

Станция	Январь			апрель			Июль			октябрь		
	A_v	S_d	A	A_v	S_d	A	A_v	S_d	A	A_v	S_d	A
Сыктывкар	-15,18	4,01	0,13	1,26	2,49	0,09	16,91	2,06	0,09	0,72	2,37	0,13
Чердынь	-16,31	3,85	0,21	1,24	2,50	0,09	17,11	2,09	0,09	0,16	2,43	0,12
Бисер	-16,91	3,49	0,16	0,64	2,41	0,05	15,70	1,87	0,06	-0,89	2,48	0,12
Пермь	-14,53	3,71	0,23	2,99	2,51	0,16	18,13	1,89	0,05	1,87	2,39	0,13
Н. Новгород	-11,11	3,81	0,30	4,81	2,61	0,20	18,97	1,88	0,04	3,96	2,19	0,08
Казань	-11,99	3,80	0,32	4,99	2,65	0,25	20,28	1,94	0,11	4,37	2,19	0,15
Уфа	-14,02	3,80	0,18	4,40	2,70	0,21	19,37	1,80	0,03	3,40	2,29	0,13
Заметчино	-10,69	4,17	0,32	5,48	2,55	0,25	19,69	1,76	0,05	4,73	1,99	0,10
Пенза	-11,18	3,79	0,33	5,53	2,67	0,26	19,93	1,82	0,05	4,69	2,23	0,10
Октябр. Городок	-11,61	4,06	0,34	5,74	2,80	0,28	20,72	1,87	0,00	4,96	2,12	0,09
Оренбург	-13,97	3,93	0,31	5,81	3,21	0,33	22,10	1,94	0,03	4,93	2,15	0,12
Урюпинск	-9,02	3,99	0,30	7,52	2,51	0,18	21,46	1,79	-0,03	6,42	2,03	0,02
ПФО	-13,04	3,53	0,26	4,20	2,39	0,19	19,20	1,63	0,05	3,28	2,09	0,11

Примечание: A_v – среднее значение, $^{\circ}\text{C}$; S_d – среднее квадратическое значение, $^{\circ}\text{C}$; A – коэффициент наклона линейного тренда, $^{\circ}\text{C}/10$ лет; ПФО – осредненная характеристика по территории округа.

В табл. 3 представлены характеристики НЧК температуры воздуха осредненные по станциям северо-востока (Сыктывкар, Чердынь, Бисер, Пермь) и юго-запада (Заметчино, Пенза, Октябрьский городок, Урюпинск).

Из табл. 3, видно, что на юго-западе ПФО в холодный период (зима, январь) температура воздуха повышается с большей скоростью, чем на северо-востоке, в теплый же период (лето, июль), наоборот, на северо-востоке потепление происходит с большей скоростью. При этом на всей территории округа в рассматриваемый период повышение ТВ в зимний период более значительно, чем в летний. Так, на северо-востоке прирост ТВ зимой составил $2,62^{\circ}\text{C}$, а летом $0,70^{\circ}\text{C}$, на юго-западе эта разница еще больше – зимой $\Delta T = 3,68^{\circ}\text{C}$, а летом лишь $0,58^{\circ}\text{C}$. Таким образом, потепление климата на территории ПФО происходит за счет зимнего периода.

Таблица 3

Характеристики низкочастотной компоненты температуры воздуха в период 1888–2018 гг.

Период	КНЛТ, $^{\circ}\text{C}/10$ лет	ΔT , $^{\circ}\text{C}$	R^2	R^2F
	Северо-восток			
Северо-восток, год	0,13	1,74	23	31
Холодный период	0,21	2,70	16	21
Зима	0,20	2,62	8	13
Январь	0,18	2,41	2	13
Теплый период	0,08	1,01	8	19
Лето	0,05	0,70	2	11
Июль	0,07	0,92	0,5	9
Юго-запад				
Юго-запад, год	0,16	2,09	27	37
Холодный период	0,25	3,29	19	26
Зима	0,28	3,68	14	22

Период	КНЛТ, °C/10 лет	ΔT , °C	R^2	R^2F
Январь	0,32	4,20	8	21
Теплый период	0,09	1,20	10	24
Лето	0,04	0,58	0	13
Июль	0,02	0,24	0	13
Примечание: R^2 – коэффициент детерминации линейного тренда, результат достоверен на уровне значимости в 5% при $R^2 \geq 1,5\%$; R^2F – вклад НЧК в дисперсию ТВ.				

В результате выполненных расчетов выявлено:

1. Долгопериодные колебания ТВ в Казани в значительной степени согласуются с колебаниями приземной ТВ осредненной по СП. Кривые НЧК имеют значительное сходство, однако современное значительное потепление началось с 1960 г. (на 15 лет раньше, чем по СП). При этом величина аномалии ТВ в заключительный период составила в Казани 1,2°C, а по всей территории СП лишь 0,8°C.
2. В период 2000–2018 гг. по сравнению с периодом 1955–1999 гг. значительно сократилось число случаев с крупной отрицательной аномалией ТВ и, наоборот, возросло число положительных.
3. Выявлены достоверные корреляционные связи между среднемесячными значениями ТВ и индексами атмосферной циркуляции NAO, AO, SCAND, AMO.
4. Выявлено, что годовая сумма атмосферных осадков в целом по ПФО возрастает. При этом заметный прирост осадков происходит в основном в весеннее и раннее летнее время, в июле на большей части ПФО осадки уменьшаются.
5. Анализ низкочастотных компонент ТВ 12 длиннорядных станций (1888–2018 гг.) позволил выделить однородные периоды с повышением (понижением температуры), оценить как величину, так и скорость этих изменений во времени на всей территории Среднего Поволжья и Предуралья.
6. Современное потепление климата охватило весь регион, при этом процесс потепления на западе ПФО происходит более активно, чем на востоке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 18-05-00721, 18-45-160006 и 20-55-00014).

ЛИТЕРАТУРА

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Корнева И.А. и др. Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2018 году // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2019. № 1. С. 97–127.
2. Кондратьев К.Я. *Глобальный климат* / СПб., Наука, 1992. 359 с.
3. Демирчян К.С., Кондратьев К.Я., Демирчян К.К. Глобальное потепление и «политика» его предотвращения // *Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера»*. 2010. Т. 2. № 4. С. 488–502.
4. Переведенцев Ю.П., Исмагилов Н.В., Шерстюков Б.Г. и др. Современные изменения климата Республики Татарстан // *Вестник Воронежского гос. Ун-та. Серия: География. Геоэкология*. 2008. № 2. С. 13–23.
5. Переведенцев Ю.П. *Теория климата* / Казань, Казан. гос. ун-т, 2009. 504 с.
6. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Важнова Н.А. Пространственно-временные изменения основных показателей температурно-влажностного режима в Приволжском федеральном округе // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 4. С. 32–48.
7. Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В. Климатические изменения приземных полей атмосферного давления и температуры воздуха в умеренных широтах Северного полушария // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 7. С. 81–93.
8. Переведенцев Ю.П., Шумихина А.В., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В. Опасные гидрометеорологические явления на территории Приволжского федерального округа // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 12. С. 20–30.
9. Переведенцев Ю.П., Соколов В.В., Наумов Э.П. *Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа* // Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2013. 273 с.

**Попов А.А.^{1*}, Гаврилов Н.М.¹, Аммосов П.П.², Гаврильева Г.А.²,
Колтовской И.И.²**

**Внутренние гравитационные волны в области мезопаузы
по измерениям ночной эмиссии гидроксила вблизи Якутска**

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет», Кафедра физики атмосферы,
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9
*E-mail: Andrew.popovix@gmail.com

²Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г.Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 677027, Якутск, пр. Ленина, 31

Метод цифровых разностных фильтров применен для анализа данных наземных наблюдений вращательной температуры ночного свечения гидроксила (ОН) на высотах 85–90 км спектрометром СП-50 вблизи Якутска (63° с. ш. 130° в. д.) в 1999–2015 гг. Исследованы сезонные и межгодовые изменения среднемесячных значений и дисперсий вариаций температуры с периодами 0.7–11 ч. Эти вариации могут быть связаны с внутренними гравитационными волнами в области мезопаузы. Среднемесячная температура вблизи мезопаузы имеет максимум зимой и минимум летом. Многолетние тренды соответствуют периодическим изменениям интенсивности мезомасштабных возмущений вблизи мезопаузы. Особенности сезонных и долговременных изменений в Якутске могут быть связаны со сложной системой фотохимических процессов, приводящих к ночному свечению ОН.

Ключевые слова: верхняя атмосфера, ночное свечение, гидроксил, вращательная температура, климатология, сезонные вариации, тренды, мезомасштабная изменчивость, внутренние гравитационные волны.

**Popov A.A.^{1*}, Gavrillov N.M.¹, Ammosov P.P.², Gavrilyeva G.A.²,
Koltovskoi I.I.²**

**Internal gravity waves near the mesopause according to measurements
of the night hydroxyl emission near Yakutsk**

¹Saint-Petersburg State University, Atmospheric Physics Department,
Russia, 199034, Saint-Petersburg, 7-9 Universitetskaya Embarkment
*E-mail: Andrew.popovix@gmail.com

²Yu.G.Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy
of Syberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 677027, Yakutsk, 31 Lenin Ave

A method of digital filtering is applied to analyze data of ground-based nightglow observations of hydroxyl (OH) rotational temperature at altitudes 85–90 km with the SP-50 spectrometer near Yakutsk (63° N, 130° E) in years 1999–2015. Seasonal and interannual variations in monthly-mean values and standard deviations of perturbations with periods 0.7–11 h are studied. These perturbations could be connected with internal gravity waves in the mesopause region. Monthly-mean temperature near the mesopause has a maximum in winter and a minimum in summer. Multi-year trends correspond to periodical changes in the mesoscale disturbance intensity near the mesopause. Peculiarities of seasonal and long-term variations at Yakutsk could be connected with a complex system of photochemical processes leading to the OH nightglow.

Keywords: upper atmosphere, nightglow, hydroxyl, rotational temperature, climatology, seasonal variations, trends, mesoscale variability, internal gravity waves.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию внутренних гравитационных волн (ВГВ) в средней и верхней атмосфере. Их источники находятся, в основном, в нижних слоях атмосферы. Распространяясь вверх, ВГВ способны переносить энергию и импульс в среднюю и верхнюю атмосферу, оказывая таким образом влияние на термодинамические процессы на всех высотах атмосферы. Измерение интенсивности и вращательной температуры свечений ночного неба является одним из способов мониторинга термодинамического режима и состава верхней атмосферы.

Распространяясь через слой ночной эмиссии верхней атмосферы, ВГВ модулируют температуру и яркость излучения [1]. Когерентные волнообразные структуры были обнаружены в слоях излучения ОН, Na, O и O₂ в интервале высот 80–100 км, начиная с [2]. В ряде работ исследовались долговременные изменения интенсивности ВГВ в верхней атмосфере. В исследовании [3] сделан статистический анализ средне- и крупномасштабных ВГВ с периодами 0.5–5 h и длинами волн 100–1700 км в слоях излучения ОН и O₂ в 1998–2001 гг. Исследовалась межгодовая и сезонная изменчивость температуры области мезопаузы по данным спектральных наблюдений гидроксильного излучения в Звенигороде и Иркутске в 2000–2010 гг. [4]. В работе [5] изучена изменчивость характеристик области мезопаузы во время внезапных стратосферных потеплений. Исследования последних лет выявили наличие многолетних изменений характеристик верхней атмосферы [6]. В [7] анализировались изменения интенсивности и вращательной температуры ночной эмиссии ОН под действием атмосферных приливов.

В [8] были применены простые разностные фильтры и проанализированы сезонные и межгодовые изменения интенсивности ВГВ на высотах 80–100 км по наблюдениям дрейфов метеорных следов и ионосферных неоднородностей. Авторы [9] использовали метод цифровой разностной фильтрации для анализа измерений прибором SATI интенсивности и вращательной температуры ОН в Алма-Ате (43° с.ш., 77° в.д.) в 2010–2017 гг. Они изучили сезонные и межгодовые изменения среднемесячных значений и дисперсий мезомасштабных возмущений с периодами 0.4–5.4 ч.

В данной работе метод цифровых разностных фильтров применен для анализа данных спектральных измерений вращательной температуры ОН на высотах 85–90 км на станции Маймага (63° с.ш., 130° в.д.) в 1999–2015 гг. Анализируются сезонные и межгодовые изменения средней температуры и интенсивности мезомасштабных вариаций с периодами 0.8–11 ч, которые могут быть связаны с ВГВ в области мезопаузы.

Прибор и метод анализа данных

Данные о ночном свечении гидроксила на высотах 85–90 км в 1999–2015 гг. были получены в Лаборатории оптики атмосферы Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН на станции Маймага (63° с.ш., 130° в.д.) в 120 км к северу от Якутска. Измерения проводились при помощи инфракрасного цифрового спектрографа (ИЦС) [10] на основе дифракционного спектрографа СП-50 [1] и регистратора в виде ПЗС камеры ST-6. ИЦС регистрирует Р-ветви полосы излучения ОН(6,2) на высоте ~87 км с разрешением ~0.8 нм. Прибор имеет угол зрения 9° и зенитный угол наклона центральной оси 49° в западном направлении [10]. Для получения достаточного отношения сигнал/шум время регистрации индивидуальных спектров составляла 10 мин. Это обеспечивало, в среднем, 70–80 измерений в течение безлунной безоблачной ночи. Метод определения вращательной температуры ОН по спектрам, регистрируемым ИЦС, описан в [10].

Для оценки интенсивности мезомасштабных возмущений в области мезопаузы применен метод, описанный в [8]. Использована численная фильтрация путем вычисления разностей между парами регистрируемых 10-минутных значений вращательной температуры ОН, T , разделенными интервалами Δt :

$$T'(t) = [T(t + \Delta t) - T(t)]/2, (1)$$

Полоса пропускания частотного фильтра (1) аналогична рассмотренной в [8, 9]. В настоящем исследовании использованы разностные фильтры (1) со значениями $\Delta t = 0.5$ ч, $\Delta t = 1$ ч и $\Delta t = 0.5$ ч. Согласно [9], максимумы пропускания этих фильтров соответствуют периодам возмущений $\tau_m \approx 1.3$ ч, $\tau_m \approx 2.7$ ч и $\tau_m \approx 5.4$ ч. Учитывая полуширины функций пропускания на уровне 0.5 от максимума (см. [9]), совокупность указанных фильтров покрывает спектральный интервал периодов 0.7 – 11 ч.

Для каждого календарного месяца наблюдений вычислялись среднее значение вращательной температуры ОН, T_0 , и дисперсии $\overline{T'^2}$ разностей (1) для указанных выше интервалов Δt . Одной из причин мезомасштабных вариаций ночных свечений могут быть ВГВ, распространяющиеся в светящемся слое верхней атмосферы. Поляризационные соотношения теории атмосферных ВГВ [11] позволяют получить

следующие формулы для связи дисперсии волновых вариаций горизонтальной скорости U и потенциальной волновой энергии E_p с мезомасштабной дисперсией и средним значением температуры:

$$U = \frac{g}{N} \sqrt{\frac{T'^2}{T_0^2}}; \quad E_p = \frac{g^2}{2N^2} \frac{\overline{T'^2}}{T_0^2}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, N – частота Брента-Вайсяля, T_0 – среднемесячная температура.

Изменчивость вращательной температуры ОН

Методом, описанным в п. 2 были обработаны данные о ночном свечении полосы ОН(6-2) на высотах 85–90 км на станции Маймага в 1999–2015 гг. На рис. 1 показаны средние за 1999–2015 гг. сезонные вариации среднемесячных значений и относительных дисперсий вращательной температуры ОН вблизи мезопаузы, а также параметров ВГВ (2) на станции Маймага.

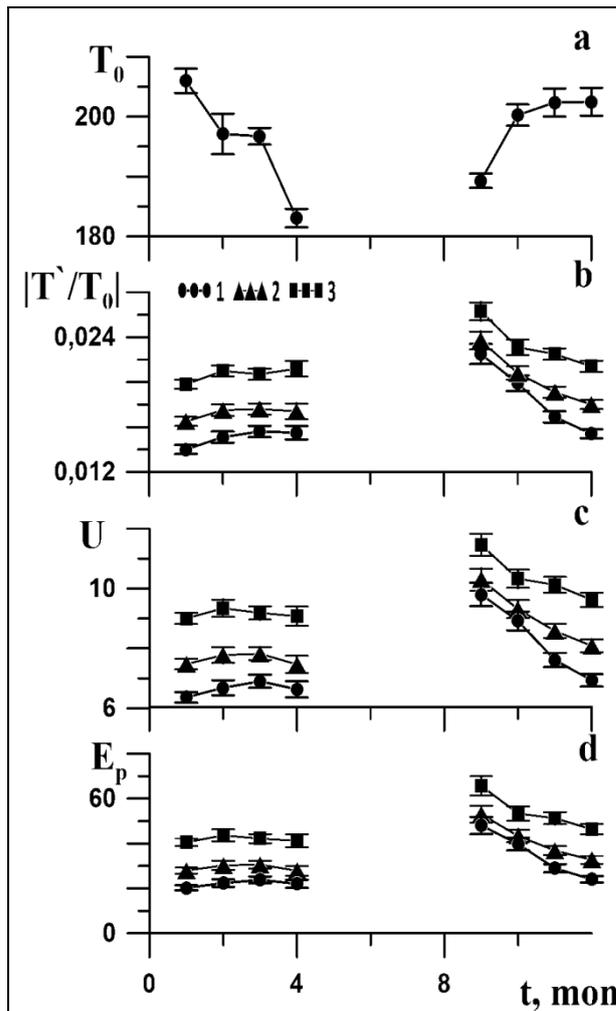


Рис. 1. Усредненные по интервалу наблюдений 1999–2015 гг. сезонные вариации среднемесячной температуры ОН в К (а), относительных дисперсий разностей температур (b), дисперсий горизонтальной скорости в м/с (с) и удельной потенциальной энергии в Дж/кг (d) для фильтров (1) с $\Delta t = 0.5$ ч (1), $\Delta t = 1$ ч (2), $\Delta t = 2$ ч (3)

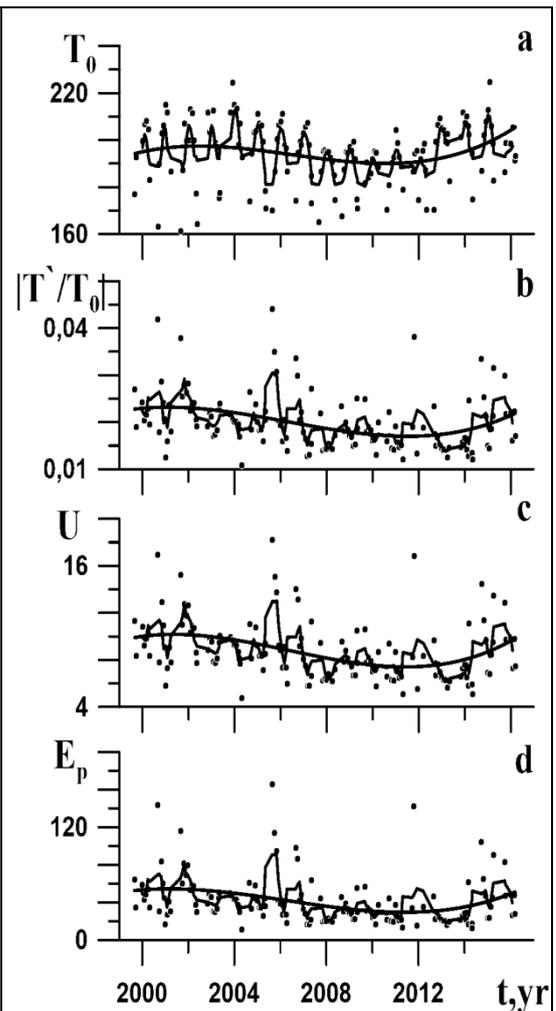


Рис. 2. Изменения среднемесячных температур ОН в К (а), относительных дисперсий температуры (b), дисперсий горизонтальной скорости в м/с (с) и удельной потенциальной энергии в Дж/кг (d) для $\Delta t = 1$ ч. Линии соответствуют 7-месячному бегущему среднему и кубичной полиномиальной аппроксимации

Измерения летом не производятся из-за светлых ночей в высоких широтах. Сезонные изменения средней температуры на рис. 1а имеют максимум зимой и минимум в летние месяцы. Полную картину сезонных вариаций дисперсий мезомасштабных возмущений температуры, ветра и потенциальной энергии на рис. 1 восстановить трудно из-за отсутствия летних измерений.

На рис. 2а представлены долгосрочные изменения среднемесячных вращательных температур ОН на станции Маймага. Тонкие линии на рис. 2 соответствуют кубическим полиномиальным аппроксимациям. Средняя температура в области мезопаузы на рис. 2а испытывает сезонные вариации, соответствующие рис. 1а. Линии регрессии на рис. 2а показывают долгосрочные межгодовые изменения. Они содержат климатические тренды температуры на высотах 85–90 километров, изучавшиеся по многолетним наземным и спутниковым наблюдениям (например, [6]), на которые накладываются возмущения из-за изменений солнечной активности и других местных атмосферных процессов, которые могут по-разному изменять температуру в разные годы. Представляется, что продолжительность анализируемых измерений в Маймаге в настоящее время недостаточна для надежных оценок климатических трендов температуры в области мезопаузы.

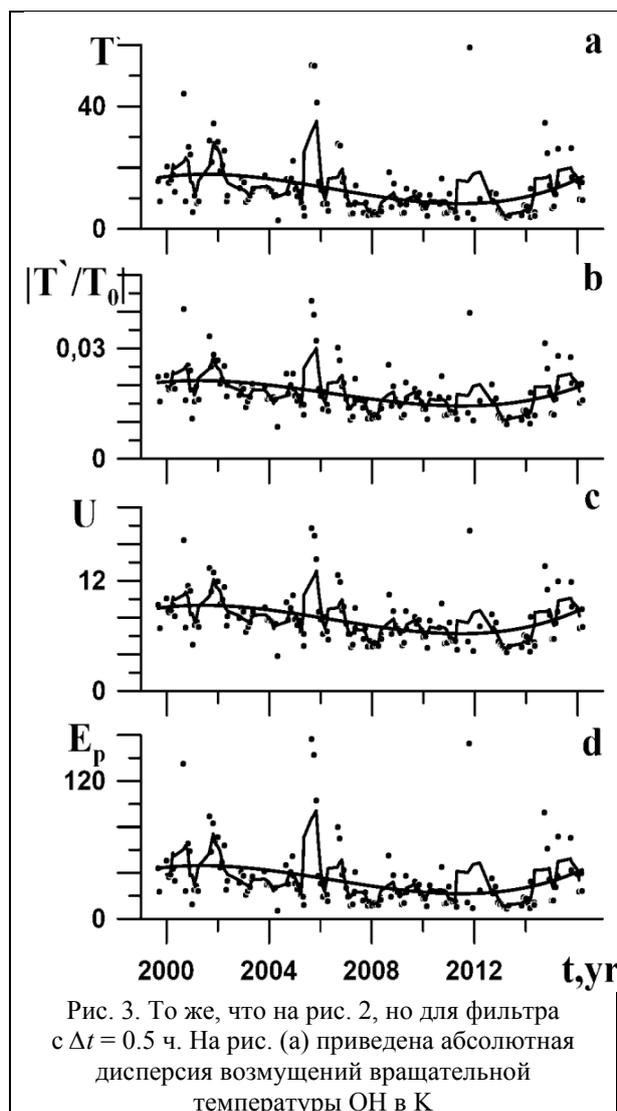


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для фильтра с $\Delta t = 0.5$ ч. На рис. (а) приведена абсолютная дисперсия возмущений вращательной температуры ОН в К

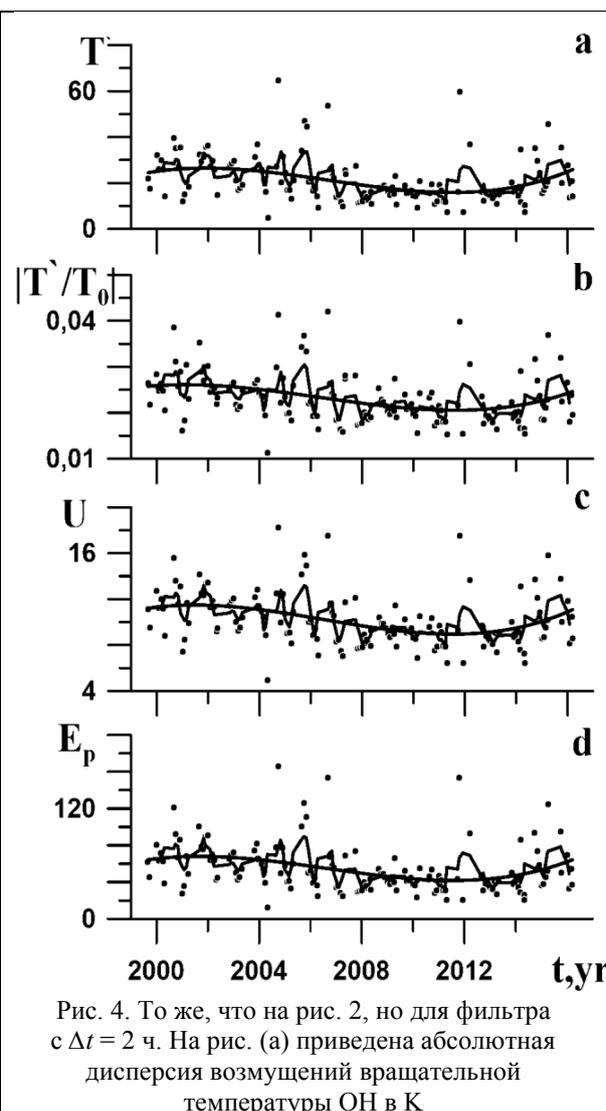


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для фильтра с $\Delta t = 2$ ч. На рис. (а) приведена абсолютная дисперсия возмущений вращательной температуры ОН в К

Дисперсия мезомасштабных возмущений температуры с периодами 1.7–5.6 h и характеристики ВГВ на рис. 2 уменьшаются до минимума в 2010–2012 гг., а затем возрастают. Это поведение соответствует росту таких же величин в Алма-Ате после 2011 г, зарегистрированному в [10].

Рис. 3 и 4 показывают межгодовые изменения мезомасштабных дисперсий вращательной температуры ОН и характеристик ВГВ, аналогичные рис. 2, но для разностных фильтров (1) с $\Delta t = 0.5$ ч и $\Delta t = 2$ ч, соответственно. Сравнения соответствующих панелей рис. 2–4 показывают подобные изменения анализируемых характеристик во всех частях спектра ВГВ с большим размахом межгодовых изменений для более короткопериодных составляющих с $\Delta t = 0.5$ ч на рис. 3. Эти различия могут быть связаны с различиями в источниках и условиях распространения атмосферных волн различных периодов. Кроме того, составляющие с большими периодами (фильтр (1) с $\Delta t = 2$ ч) могут содержать вклад от полусуточного прилива и его высокочастотных гармоник.

Сезонные изменения интенсивности мезомасштабных возмущений на станции Маймага, показанные на рис. 1 не противоречат сезонным вариациям тех же величин в Алма-Ате, которые имеют максимумы весной и летом [10]. Авторы [11] разработали численную модель спектра гармоник ВГВ, распространяющихся в верхнюю атмосферу от случайных источников, распределенных в атмосфере. Они применили эту модель для того, чтобы объяснить сезонные изменения амплитуд ВГВ на разных высотах. Было показано, что различия сезонных вариаций могут быть вызваны изменениями вертикальных профилей средних температуры и ветра, которые влияют на диссипацию и распространение ВГВ, а также могут влиять на интенсивность атмосферных источников волн. В частности, может изменяться генерация ВГВ гидродинамическими источниками внутри верхне-тропосферного и страто-мезосферного струйных течений.

Тропосферный средний ветер направлен на восток во все сезоны. Ветры в стратосфере и мезосфере изменяют направление на противоположное летом. Следовательно, возбуждение в тропосфере волн восточного направления изменяет пропорцию слабо затухающих ВГВ, распространяющихся навстречу среднему ветру в летней стратосфере и мезосфере в разные сезоны. Кроме того, изменяющиеся ветры, существующие в стратосфере и мезосфере, летом могут изменять интенсивность источников ВГВ в средней атмосфере [11], которая может способствовать образованию максимумов интенсивности ВГВ в нижней термосфере в различные сезоны.

Полученные выше результаты показывают, что долговременные изменения интенсивности ВГВ могут различаться в разные годы. Эти изменения могут отражать изменения средних ветров и температуры в средней атмосфере. Поэтому, многолетние оптические и радарные наблюдения необходимы для непрерывного мониторинга изменений в мезосфере и нижней термосфере.

Заключение

В настоящем исследовании метод цифровых разностных фильтров (1) применен для анализа данных наблюдений вращательной температуры гидроксила на высотах 85–90 км на станции Маймага вблизи Якутска с применением ИЦС на основе спектрографа СП-50. Исследованы сезонные и межгодовые изменения среднемесячной температуры и дисперсии вариаций с периодами 0.7–11 ч., которые могут быть связаны с ВГВ в области мезопаузы. Для выделения вариаций с часовыми периодами использована численная фильтрация путем вычисления разностей (1) между значениями измеренных вращательных температур ОН, разделенными интервалом времени Δt . С использованием поляризационных соотношений теории ВГВ получены оценки дисперсии колебаний горизонтальной скорости и удельной потенциальной энергии мезомасштабных вариаций для каждого календарного месяца наблюдений ночного свечения ОН. Средние сезонные вариации мезомасштабных дисперсий температуры и характеристик ВГВ имеют максимумы зимой и летом.

Анализ данных наблюдений ночного свечения ОН поддержан Российским фондом фундаментальных исследований по гранту № 19-35-90130. Используются данные ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

ЛИТЕРАТУРА

1. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. / М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
2. Krassovski V.I. Infrasonic variations of OH emission in the upper atmosphere // *Annales de Géophysique*. 1972. V. 28. P. 739–746.
3. Gavrilov N.M., Shiokawa K., Ogawa T. Seasonal variations of medium-scale gravity wave parameters in the lower thermosphere obtained from SATI observations at Shigaraki, Japan // *J. Geophys. Res.* 2002b. V. 107. N D24. P. 4755.
4. Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В. и др. Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2014. Т. 54, № 2. С. 246–256. DOI: 10.1134/S0016793214020157.
5. Перцев Н.Н., Андреев А.Б., Мерзляков Е.Г. и др. Мезо-сферно-термосферные проявления стратосферных потеплений: совместное использование спутниковых и наземных измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 1. С. 93–100.
6. Lastovichka J. A review of recent progress in trends in the upper atmosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2017. V. 163. P. 2–13.

7. Гаврильева Г.А., Аммосов П.П., Колтовской И.И. Полусуточный термический прилив в области мезопаузы над Якутией // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49. №. 1. С. 117–122. DOI: 10.1134/S0016793209010150.
8. Gavrilov N.M., Jacobi Ch., Kurschner D. Climatology of ionospheric drift perturbations at Collm, Germany // Adv. Space Res. 2001. V. 27. N 10. P. 1779–1784.
9. Попов А.А., Гаврилов Н.М., Андреев А.Б., Погорельцев А.И. Междугодовые изменения интенсивности мезомасштабных вариаций ночного свечения гидроксидов в Алма-Ате // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. №. 2. С. 102–108. DOI: 10.12737/szf-42201810.
10. Колтовской И.И. Исследование волновых процессов в области высокоширотной мезопаузы по излучению молекул гидроксидов и кислорода. /Автореферат кандидатской диссертации. Якутск. 2017. 16с.
11. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. / М.: Мир, 1978. 532 с.
12. Gavrilov N.M., Fukao S., Nakamura T., et al. Comparative study of interannual changes of the mean winds and gravity wave activity in the middle atmosphere over Japan, Central Europe and Canada // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002a. V. 64 P. 1003–1010.

**Синькевич А.А.^{1*}, Абшаев М.Т.², Абшаев А.М.², Аджиев А.Х.³,
Михайловский Ю.П.¹, Попов В.Б.¹**

**Исследование грозо-градового облака
с использованием данных зондирования со спутника Метеосат**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория»
Россия, 194025, Санкт-Петербург, Карбышева, 7
*E-mail: sinkevich51@mail.ru

²Научно-Производственный Центр «Антиград»
Россия, 360004, Нальчик, ул. Чернышевского, д. 198

³Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Высокогорный геофизический институт»
Россия, 360030, Нальчик, пр. Ленина, 2

Представлены результаты исследования дистанционными радиофизическими средствами особенностей процессов электризации в суперячейковом облаке, развившемся 19 августа 2015 г. на Северном Кавказе. Использовались данные спутника "Meteosat", доплеровских метеорологических радиолокаторов и грозопеленгационной системы.

Ключевые слова: суперячейковое облако, радиолокатор, грозопеленгационная система, спутник.

**Sin'kevich A.A.^{1*}, Abshaev M.T.², Abshaev A.M.², Adjiev A.H.³,
Michailovsky Yu.P.¹, Popov V.B.¹**

Thunderstorm investigation using Meteosat data

¹ Main Geophysical Observatory,
Russia, 194021, Saint-Petersburg, Karbyshev str. 7
*E-mail: sinkevich51@mail.ru

² Hail Suppression Research Center "Antigrad",
Russia, 360004, Chernishevskogo, 198

³ High Mountain Geophysical Institute,
Russia, 360030, Lenin avenue, 2

Results of studies of supercell thunderstorm electrization are presented in the article. The thunderstorm developed on August 19, 2015 in the Northern Caucasus. Data of Meteosat satellite, Doppler weather radars and lightning detection system were used for this investigation.

Keywords: supercell thunderstorm; satellite, radar, lightning detection system.

Введение

Среди облаков вертикального развития особое место занимают суперячейковые облака. Это грозовые кучево-дождевые облака, которые характеризуются наличием мезоциклона и вращающегося вертикального потока. Обычно это наиболее мощные облака, с которыми связаны такие опасные явления как град, шквалы, смерчи и др. [1]. Главным техническим средством, позволяющим получить сведения о них, является радиолокатор. В последнее время все чаще применяются различного рода грозопеленгационные системы, измеряющие характеристики электрических разрядов. Работы в области спутниковой метеорологии, выполненные К.Я. Кондратьевым [2], [3] и позднее многими другими исследователями, показали, что искусственные спутники Земли являются важным инструментом, позволяющим получать дополнительную информацию о кучево-дождевых облаках (Cb), особенно при их развитии до стадии суперячейковых.

Целью настоящей статьи является исследование характеристик суперячейкового Cb, а также связи между его параметрами и частотой молний. Облако развивалось на Северном Кавказе 19 августа 2015 г.

Для анализа его развития были использованы: измерения, выполненные 5 радиолокаторами разного типа и диапазона, данные радиометра "SEVERI", установленного на геостационарный спутник "Meteosat-10", а также данные грозопеленгационной системы LS 8000 [4].

Общие сведения о развитии облака

По данным радиолокаторов с 10 час 20 мин до 20 час 00 мин ВСВ наблюдалось развитие двух суперячейковых кучево-дождевых облаков и нескольких более слабых градовых Сб, которые преимущественно перемещались с запада на восток со скоростью 60–75 км/ч. Первая, наиболее мощная ячейка, характеристики которой исследуются в настоящей статье, сформировалась на территории Республики Адыгея. Она пересекла нескольких районов Северного Кавказа, и в общей сложности прошла путь около 635 км, двигаясь на восток. Отмечалось периодическое усиление и ослабление облака.

Максимальное значение радиолокационной отражаемости было зарегистрировано в 12 час 58 мин, отражаемость составила 75 dBZ, при этом верхняя граница облака располагалась на высоте 16,2 км. Вертикально интегрированная водность достигла максимального значения 120 кг/м², а интенсивность осадков – 600 мм/ч. Размер градин на большей части градовой дорожки был равен 2–3 см, а во время максимального развития облака достигал 6 см.

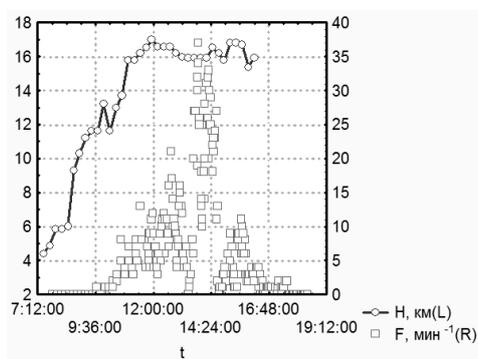


Рис. 1. Изменение во времени высоты верхней границы H облака и частоты отрицательных молний облако-земля F

По измерениям радиационной температуры в канале 10,8 мкм радиометра "SEVERI", установленного на спутник "Meteosat-10", была определена радиационная температура пикселей, соответствующих верхней границе облака. С учетом распределения температуры по высоте, полученного из данных радиозондирования, построено изменение высоты верхней границы облака во времени. Максимальное значение отмечено в 12 час 00 мин и составило 17 км (рис.1). Анализ информации радиолокаторов с доплеровской обработкой и также ортогональной поляризацией радиоволн показал, что в период с 11 час 30 мин до 14 час 33 мин существовали признаки [5], указывающие на наличие смерча.

Частота электрических разрядов была получена на основе измерений грозопеленгационной системы LS-8000. На рис. 1 представлено изменение во времени частоты отрицательных молний облако-земля. Она существенно меняется на протяжении жизни облака, имеется два выраженных максимума: первый – в 12 час 40 мин со значением 21 мин⁻¹, а второй в 14 час 20 мин – 37 мин⁻¹.

Рассмотрим более подробно характеристики Сб в важные периоды его жизни. К таким периодам относится 12 час 00 – в это время облако достигло максимального вертикального развития, и 14 час 20 мин, когда наблюдалась максимальная электрическая активность (частота молний была наибольшей).

Характеристики Сб в период максимального вертикального развития

Вершина исследуемого кучево-дождевого облака достигла максимальной высоты в 12 час 00 мин. Она пробила тропосферу и располагалась в стратосфере на высоте 17 км (рис 1). Минимальная радиационная температура пикселя была равна -60,7°C. Это время, когда отмечено наиболее интенсивное развитие облака. На рис. 2 представлено композитное изображение облака, базирующееся на комбинации изображений в 3 каналах радиометра "SEVERI": 0,6, 0,8 и 1,6 мкм. Восходящие потоки были наиболее интенсивными, на это указывает значительное увеличение разности радиационной температуры в каналах водяного пара и окне прозрачности WV6,2 – IR10,8 [6], которая достигла максимального значения +3,7°C. Её положительные значения указывают на то, что восходящие потоки доставляют к вершине облака большое количество водяного пара, имеющего температуру существенно выше, чем температура

окружающего воздуха. Происходит формирование характерной «шапки» над облаком, которая в англоязычной литературе называется “overshooting top”.

В структуре поля радиационной температуры прослеживается наличие «Cold-V сигнатуры», характерной для суперячеек, и указывающей на наличие опасных явлений, связанных с кучево-дождевыми облаками. Более холодные области, имеющие U/V пространственную форму, располагаются на периферии облака, а более теплые – в его внутренней части [7]. Радиолокационные измерения показали, что в этот период времени максимальная отражаемость доходила до 75 dBZ, что указывало на наличие очень крупных частиц града в облаке. Частота электрических разрядов была относительно небольшой, составляя для отрицательных молний 2–5 мин⁻¹.

Характеристики Сб в период максимальной электрической активности

Максимальная электрическая активность облака была зарегистрирована в 14 час 20 мин. В это время высота его верхней границы составляла 16,5 км, минимальная радиационная температура пикселя равнялась -58,0 °С. Облако представляло собой мезомасштабную систему протяженностью 200–300 км (рис. 2), где чередовались ячейки, находящиеся на разных стадиях развития. Представленное распределение поля радиационной температуры указывает на ее существенную неоднородность, изменения достигают 20 °С. В отдельных ячейках по-прежнему формировался град, максимальное значение отражаемости было равно 75 dBZ, что является чрезвычайно большим значением и редко фиксируется в облаках. Анализ радиолокационных данных показал, что в это время могли наблюдаться смерчи, связанные с отдельными ячейками рассматриваемой мезомасштабной системы облаков. Большое количество водяного пара было перенесено в верхние слои атмосферы, где образовались облака верхнего яруса протяженностью несколько сотен километров.

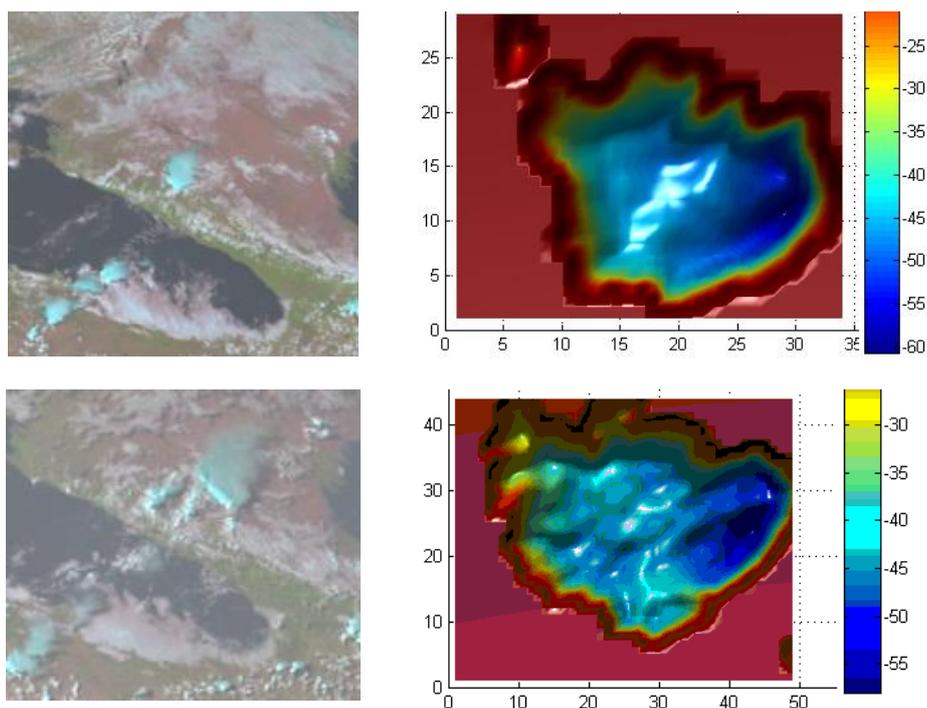


Рис. 2. Изображение облака (слева); поле радиационной температуры (справа), горизонтальная и вертикальные оси в пикселях, шкала в °С (12 час 00 мин (сверху) и 14 час 20 мин (снизу))

Связь частоты молний с радиолокационными характеристиками

Ранее выполненные исследования показали, что существует достаточно тесная корреляционная связь между параметрами одноячейковых Сб и частотой молний [8]. Такая связь наблюдается для параметров, связанных с наличием крупных ледяных частиц. В случае многоячейковых кучево-дождевых облаков данные связи ослабевают, что объясняется наличием ячеек, находящихся на разных стадиях жизни [9]. Была предпринята попытка обнаружить подобные связи для исследуемого суперячейкового облака.

Анализ регрессионных связей между радиолокационными характеристиками и частотой электрических разрядов показал, что максимальную корреляцию $R=0,7$ имеет пара: объем переохлажденной части с радиолокационной отражаемостью более 45 dBZ и частота молний облако-земля. Коэффициент корреляции между частотой внутриоблачных разрядов и указанным выше объемом облака составил $R=0,63$. Такая же слабая корреляция была обнаружена между частотой внутриоблачных разрядов и максимальной отражаемостью Z_m ($R=0,66$). Связь между частотой разрядов и другими радиолокационными характеристиками практически отсутствовала.

Таким образом, полученные данные согласуются с нашими предыдущими результатами, которые показали, что корреляционные связи между параметрами грозových многоячейковых облаков и частотой электрических разрядов весьма слабые, в отличие от случаев одноячейковых облаков.

Выводы

Представлены результаты исследования характеристик суперячейкового Сб, а также особенностей процессов формирования молний в нем. В процессе развития облака образовалась мезомасштабная облачная система протяженностью несколько сотен километров.

Высота верхней границы Сб достигала 17 км, максимальная радиолокационная отражаемость - 75 dBZ, а частота молний облако-земля - 35 мин⁻¹. Анализ поля радиационной температуры на верхней границе облака показал наличие «Cold-V сигнатуры», характерной для суперячеек, и указывающей на возможность появления опасных явлений, связанных с кучево-дождевыми облаками.

Корреляционные связи между частотой электрических разрядов в облаке и радиолокационными характеристиками оказались весьма слабыми.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ БРИКС_m 18-55-80020.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ажигов И.О. Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. №1 (16). С. 223–236.
2. Кондратьев К.Я. Метеорологические спутники/ Ленинград, Гидрометеиздат, 1963, 311
3. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М.. Термическое зондирование атмосферы со спутников / Ленинград, Гидрометеиздат, 1970, 410 с.
4. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В. О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 2–13.
5. Ryzhkov A.V., Zrníc D. S. Radar Polarimetry for Weather Observations // Switzerland, Springer, 2019, 486 p.
6. Краус Т.В., Синькевич А.А, Гхулам А.С. Измерение осадков большой интенсивности дистанционными методами // Метеорология и гидрология. 2012. N7. С.15–27.
7. Bedka K. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // Atm. Res. 2011. № 2 (99). P. 175–189.
8. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д., Гопалакришнан В., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Куров А.Б., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2: Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 31–45.
9. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Абшаев А.М. Исследование связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками для многоячейкового кучево-дождевого облака // Тр ГГО. 2018. Вып. 591. С. 25–41.

Сухинов А.И.¹, Чистяков А.Е.^{1*}, Ляпунова И.А.², Проценко С.В.¹

Анализ возможности применения предложенной гидрофизической модели для расчёта объёмов и площадей зон загрязнения взвесью и другими примесями

¹Донской государственный технический университет
344000, Ростов-на-Дону, Площадь Гагарина 1
*E-mail: cheese_05@mail.ru

²Южный федеральный университет
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

Модельные расчеты с учетом объёмов и площадей зон загрязнения взвесью и другими примесями, учитывающие разномасштабную турбулентность, осаждение взвесей, условия сцепления для взвешенных частиц на границе «вода-дно», струйные эффекты, залповый сброс грунта, позволяют точнее оценивать пространственное распределение концентраций загрязняющих веществ и размеры зон их воздействия. Для адекватной оценки масштабов и интенсивности воздействий на водную среду и её обитателей в таких моделях очень важно учитывать множество особенностей процессов и факторов. В данной работе описан усовершенствованный комплекс объединенных моделей транспорта взвешенного вещества и наносов, учитывающий динамические изменения расчетной области, изменение плотности среды за счет наличия взвесей и их многокомпонентный характер.

Ключевые слова: разномасштабная турбулентность, струйные эффекты, многокомпонентные примеси, пространственное распределение концентраций, загрязняющие вещества.

**Alexander I. Sukhinov¹, Alexander E. Chistyakov^{1*},
Irina A. Lyapunova², Sophia V. Protsenko¹**

Analysis of the possibility of using the proposed hydrophysical model for calculating the volumes and areas of pollution zones by suspended matter and other impurities

¹Don State Technical University
Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1
*E-mail: cheese_05@mail.ru

²South Federal University
Russia, 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42

Model calculations, taking into account the requirements for models for calculating the volumes and areas of contaminated areas with suspension and other impurities, taking into account multi-scale turbulence, sedimentation of suspensions, adhesion conditions for suspended particles at the water-bottom interface, jet effects, including such an important effect as accelerated initial immersion of a «heavy» jet or volley dumping of the soil makes it possible to more accurately estimate the spatial distribution of concentrations of pollutants and the size of their zones of influence. For an adequate assessment of the extent and intensity of impacts on the aquatic environment and its inhabitants in such models, it is necessary to take into account many processes and conditions. This paper describes an improved software package of coupled models of sediment and suspended matter transport that takes into account dynamic changes in the computational domain, changes in the density of the medium due to the presence of multicomponent suspensions.

Keywords: multilevel turbulence, jet effects, multicomponent impurities, spatial distribution of concentrations, contaminants.

Введение

Согласно общепринятым требованиям, предъявляемым к моделям для расчёта площадей и объёмов зон загрязнения взвесью и другими примесями, для эффективной оценки масштабов и

интенсивности воздействий на акваторию – на разнообразие её флоры и фауны – должны учитываться следующие процессы и условия:

1) в первую очередь это – разномасштабная турбулентность, определяющая параметры смешения для различных фаз процесса, при этом обязательно надо учитывать процессы турбулентности;

2) осаждение взвесей – для адекватного описания транспорта взвеси необходимо использовать трехмерную модель, при этом слагаемые, описывающие осаждение взвеси, должны быть включены в данную модель, а скорость осаждения каждой из компоненты может быть рассчитана на основе закона Стокса или по экспериментальным данным;

3) необходимы условия сцепления для взвешенных частиц на границе «вода–дно» – осаждение взвеси на донную поверхность учитывается в граничных условиях на нижней поверхности модели транспорта взвеси; в модели также нужно учитывать изменения геометрии дна водоема, а на границе раздела сред «вода–дно» в гидродинамической модели необходимо использовать граничные условия, описывающие тангенциальные напряжения;

4) условия на границе раздела сред «вода–воздух» – на поверхности водоема в гидродинамической модели необходимо задавать граничные условия;

5) особое значение имеют струйные эффекты, включая такой важный эффект как ускоренное начальное погружение «тяжелой» струи или залповый сброс грунта.

Одним из негативных влияний антропогенного влияния на окружающую среду характеризуются дноуглубительные работы в водных объектах [1]. Разработанные в ходе исследований численные алгоритмы и комплекс программ использованы для исследования гидробиологических процессов при ремонтных дноуглубительных работах, рассчитаны значения площадей областей, при которых наблюдается гибель донной растительности на отвалах и в районах дноуглубительных работ. Возникает вопрос о возможности применения гидрофизической модели для расчёта областей загрязнения взвесью и другими примесями.

Материалы и методы исследования

На основании натурных данных разработана трехмерная модель волновых гидродинамических процессов, которая описывает движение водной среды с учетом выхода волны на берег, а также современный программный комплекс, адаптированный для моделирования гидродинамических волновых процессов, областью применения которого является построение поля скоростей и давления водной среды, и оценка гидродинамического воздействия на берег при наличии поверхностных волн. Для решения задачи гидродинамики используется известный метод поправки к давлению [4, 5]. Для определения степени заполненности ячейки рассматривается давление столба жидкости внутри данной ячейки [6, 7] и вводятся коэффициенты, описывающие заполненность областей в окрестности ячейки. Для моделирования гидрофизических процессов, в случае сложной и динамически изменяемой геометрии расчетной области, как правило, используют неравномерные сетки [8]. При расчете поля скорости движения водной среды лучше использовать грубые сетки с охватом большого прилегающего района. В качестве входных данных при решении задач гидродинамики должна использоваться карта рельефа дна. В качестве примера практического использования проблемно-ориентированного комплекса программ решается задача расчета полей скорости и давления. Выделенный участок моделирования имеет размеры 50×50 м и глубину 2 м, пиковая точка возвышается над уровнем моря на 2 м. Источник возмущений задается на некотором расстоянии от линии берега. В начальный момент времени жидкость находилась в состоянии покоя. Использована сетка размерами 100×100×40, а шаг по времени равен 0,01 секунды для решения поставленной задачи; участок суши был затоплен набегающей волной (рис. 1).

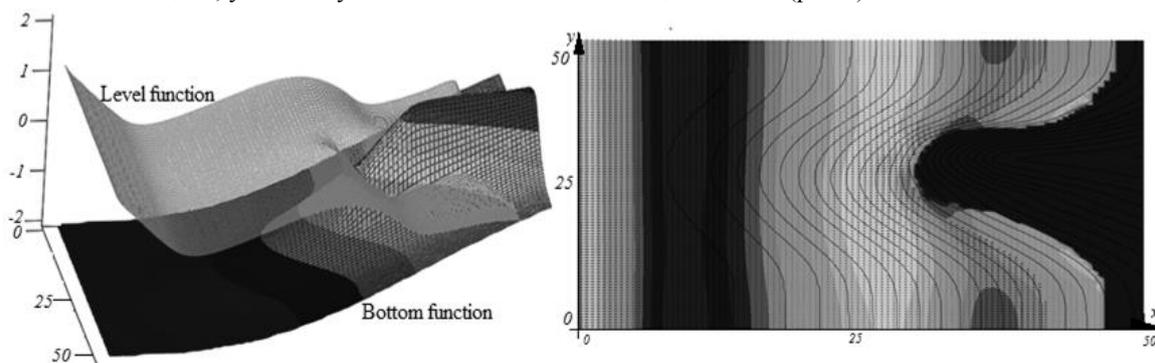


Рис. 1. Функция возвышения уровня и рельефа дна

В работе [9] приведены результаты сопоставления модели гидродинамики с натурными данными, полученными в результате экспедиционных исследований с использованием двух комплектов зондов ADCP WHS 600 Sentinel, размещенных на двух судах, в ходе которых были осуществлены комплексные измерения параметров водной среды [4], а также произведена верификация используемых методов расчета коэффициента вертикального турбулентного обмена. Кроме этого, в работе [5] выполнено сопоставление результатов моделирования с натурными данными для штормового нагона в Таганрогском заливе 24–25 сентября 2014 г., когда под действием ураганного ветра в течение более чем 30 часов, скорость которого при порывах достигала 40 м/сек, произошел подъем уровня относительно невозмущенной поверхности более чем на 420 см.

Моделировалась ситуация, при которой в нулевой момент времени происходит выброс взвеси. Источник взвеси расположен по координате Ox в 5 м от источника колебаний – в левой границе области, по центру расчетной области по оси Oy и на 20 см ниже уровня жидкости по оси Oz ; плотность взвеси равна 2700 кг/м^3 .

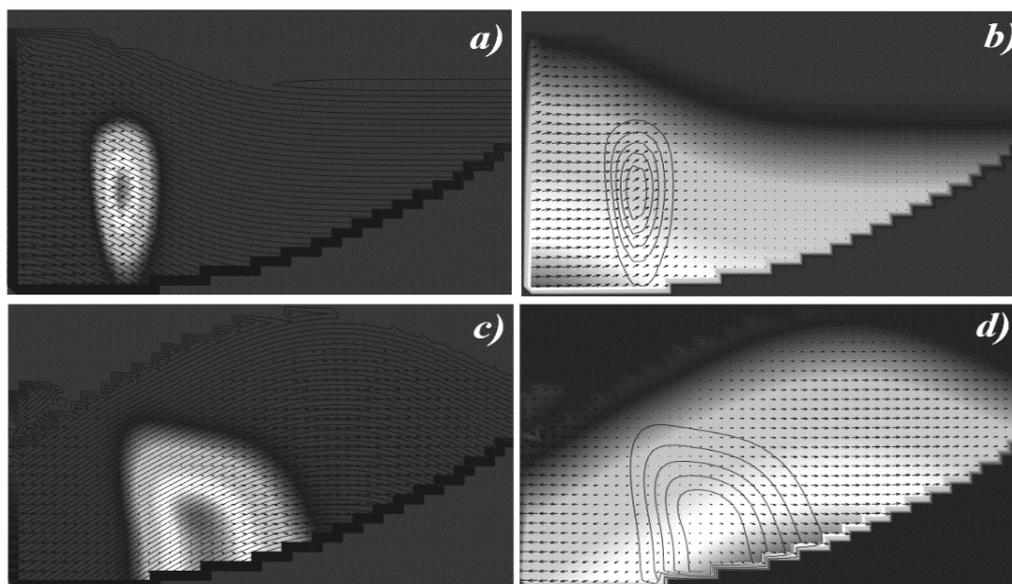


Рис. 2. Концентрация взвеси через 2 (а, b) и 5 (с, d) с после момента выброса.
а, с – палитрой показано поле концентраций, b, d – палитрой показано поле давления

На рис. 2 показано моделирование такого важного эффекта как «струйный эффект», когда происходит ускоренное начальное погружение «тяжелой» струи при залповом сбросе грунта; верификация модели транспорта взвеси и описана в работе [1].

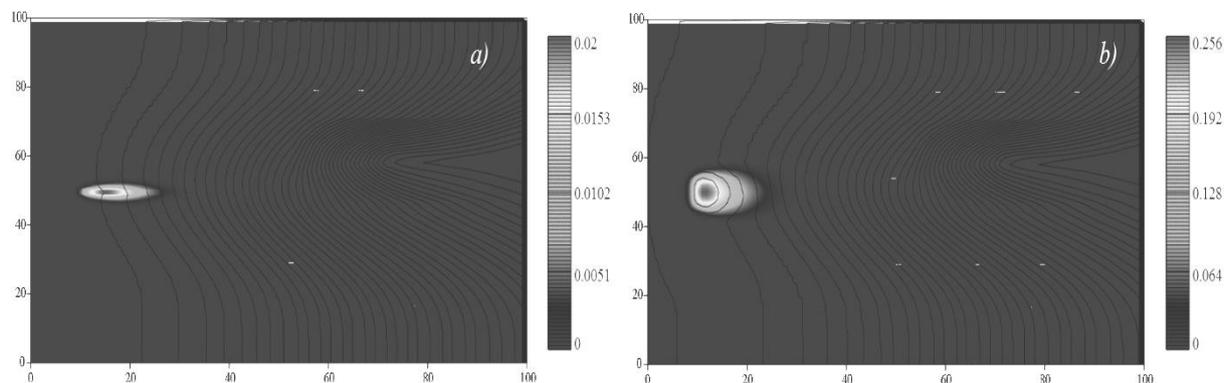


Рис. 3. Изменение функции рельефа дна.
а – отвал размерами 1x1 м, b – отвал размерами 3.5x3.5 м

Исходными данными моделирования являлись: максимальная глубина водоема 2 м; на отвале размерами 1м×1м объем загрузки 0.289 м³ (рис. 3.а); на отвале размерами 3.5х3.5 м объем загрузки 5.729 м³ (рис. 3.б); скорость осаждения определялась в диапазоне от 1 до 10 мм/с; плотность грунта 2700 кг/м³.

Результаты эксперимента позволяют достаточно эффективно исследовать динамику изменения геометрии дна, образования различных структур и наносов, переноса взвесей в водной среде и уровень загрязнения вод (рис. 3), появление морских гряд и кос, их рост и трансформацию, а также прогнозировать заиливание подходных судоходных каналов, заносимость гидротехнических конструкций и сооружений и изменение поля концентрации в случае выброса от источника [9].

Заключение

Модельные расчеты с учетом описанных выше подходов и эффектов, а также многолетних данных о гидрологическом режиме района проведения работ, позволяют точнее оценивать пространственное распределение концентраций загрязняющих веществ и размеры зон их воздействия. Учет физических эффектов отвечает требованиям к моделям, используемым для расчёта объёмов и площадей области покрытия взвесью и другими примесями [6–9].

Результаты моделирования рассматриваемых гидрофизических процессов должны включать набор компонентов: средние за период существования объёмы областей шлейфа взвеси с концентрациями выше заданных величин, обусловленных порогами толерантности гидробионтов; время существования областей шлейфа; расчёты по взвеси выполняются с учетом её фоновых концентраций; средние и максимальные расстояния распространения загрязнений от источника сброса, а также от края траншеи, котлована, концентраций примесей; данные, не соответствующие экологическим нормативам (предельно допустимый сброс), могут предоставляться без включения в официальный документ – для согласования и корректировки технических решений; площади соприкосновения с дном областей шлейфа с концентрациями выше заданных пороговых величин; время воздействия на гидробионтов на площадях областей заданных концентраций; объёмы протекающей в шлейфе загрязненной воды при относительно постоянной подпитке от источника загрязнения с концентрациями загрязняющих веществ больше заданных пороговых величин; время воздействия концентраций выше пороговых на водную среду (и гидробионтов) в потоке; площади выпадения на дно взвешенных веществ с различной толщиной отложений; средние и максимальные расстояния распространения зон осадков с различной толщиной донных отложений от источника сброса, в том числе от края траншей, котлованов, подводных карьеров и прочих зон дноуглубительных работ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-31-51017 Научное наставничество).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковтун И.И., Проценко Е.А., Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Расчет воздействия на водные биоресурсы Дноуглубительных работ в белом море // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2016. Т. 9, № 2. С. 27–98.
2. Монин А.С. Турбулентность и микроструктура в океане // *Успехи физических наук*, 1973. Т. 109, № 2. С. 333–354.
3. Шокин Ю.И. и др. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами / Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 164 с.
4. Никитина А.В., и др. Дифференциально-игровая модель предотвращения заморозов в мелководных водоемах // *Управление большими системами: сборник трудов*. 2015. № 55. с. 343–361.
5. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Шишени А.В., Тимофеева Е.Ф. Предсказательное моделирование прибрежных гидрофизических процессов на многопроцессорной системе с использованием явных схем, *Матем. моделирование*, 30:3 (2018), с. 83–100.
6. Четверушкин Б.Н., Якововский М.В. Вычислительные алгоритмы и архитектура систем высокой производительности // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2018, 052, 12 с.
7. Петров И.Б., Фаворская А.В., Хохлов Н.И. Сеточно-характеристический метод на системах вложенных иерархических сеток и его применение для исследования сейсмических волн, *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.*, 57:11 (2017), с. 1804–1811.
8. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. 616 с.
9. Проценко С.В. и др. Экспериментальное исследование силовых нагрузок на опоры надводной конструкции на основе математической модели волновых процессов // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика*. 2019. Т. 8, № 3. С. 27–42. DOI: 10.14529/cmse1903.

Yuri N. Skiba, David Parra-Guevara

Methods of estimation and control of contaminants

Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera
Av. Universidad 3000, CU/UNAM, Ciudad de México, C.P. 04510, México

E-mail: skiba@unam.mx

E-mail: pdavid@atmosfera.unam.mx

The problems of environmental protection and short-term control of emission rates are formulated. A method of optimal control is proposed to prevent dangerous levels of pollution generated by point sources (factories, oil spill, cleaning of water systems contaminated with oil or biofilm), linearly distributed sources (automobile emissions), or surface-distributed sources (fires).

Keywords: dispersion model; adjoint method; evaluation of concentrations, control of contaminant.

Introduction

The intensive development of transport and industrial complexes results in polluting the environment and ecological misbalance in many regions of our planet [1]. This work considers dispersion of a quasi-passive pollutant in a bounded domain with open boundaries and proposes a method for preventing dangerous levels of pollution generated by point sources (factories, oil spill, cleaning of water systems contaminated with oil or biofilm), linearly distributed sources (automobile emissions), or surface-distributed sources (fires).

Dual (direct and adjoint) estimates of the pollution level in control zones are derived to study the sensitivity of the dispersion model to variations in its parameters, and to develop strategies to control emissions. An optimal short-term control strategy of emission rates of pollution sources is proposed. This strategy prescribes to reduce the intensity of the pollution sources in advance, in order to avoid in the following days violations of air (water) quality standards in the control zones. Four examples that illustrate the application of the new control strategies are given.

Dispersion model in a limited area

To simplify the study, we consider a two-dimensional (vertically averaged) problem of pollutant dispersion. However, the methods can be applied to 3D problems as well. We consider the process of dispersion of contaminants independently from the fluid dynamics problem, supposing that the velocity is known from observations or a dynamic model.

Suppose that in a two-dimensional limited domain D with boundary S , there are N industrial enterprises located at points $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$. Let $\phi(\mathbf{r}, t)$ be a concentration of a pollutant in point $\mathbf{r} = (x, y)$ and moment $t > 0$. The propagation of the pollutant is considered in a domain D and time interval $(0, T)$ using the advection-diffusion-reaction equation

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi + \text{div}(\mathbf{U} \phi) + \sigma \phi - \text{div}(\mu \nabla \phi) = f(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

where $\mathbf{U}(\mathbf{r}, t) = \{u(\mathbf{r}, t), v(\mathbf{r}, t)\}$ is the wind velocity vector, $\sigma(\mathbf{r}, t) > 0$ characterizes the speed of exponential decay of $\phi(\mathbf{r}, t)$ due to various physical and chemical processes, $\mu(\mathbf{r}, t) > 0$ is the turbulent diffusion coefficient, ∇ is the 2D gradient,

$$f(\mathbf{r}, t) \equiv \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \quad (2)$$

$Q_i(t)$ is the emission rate of the i th source, and $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ is the Dirac function. It is assumed that velocity $\mathbf{U}(\mathbf{r}, t)$ is known and satisfies the continuity equation

$$\text{div} \mathbf{U} = 0 \quad (3)$$

Equation (1) is solved with initial condition

$$\phi(\mathbf{r}, 0) = \phi^0(\mathbf{r}) \quad \text{at } t = 0 \quad (4)$$

Normally the pollution flux through the open boundary S of domain D is unknown, and special boundary conditions are required to pose the problem correctly physically and mathematically [2]. For this purpose, we introduce the projection $U_n = \mathbf{U} \cdot \mathbf{n}$ of velocity \mathbf{U} on the unit external normal \mathbf{n} to the boundary S of domain D , and divide the whole boundary into the “inflow” part S^- (where $U_n < 0$, and the pollution flux is directed inside D) and “outflow” part S^+ (where $U_n \geq 0$, and the pollution flux is directed outside D) (Fig.1). Then we take the following boundary conditions:

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial}{\partial n} \phi &= 0 \quad \text{at } S^+ \\ \mu \frac{\partial}{\partial n} \phi - U_n \phi &= 0 \quad \text{at } S^- \end{aligned} \quad (5)$$

Problem (1)-(5) has unique solution, that continuously depends on the initial distribution $\phi^0(\mathbf{r})$, and on the number N , emission rates $Q_i(t)$ and positions \mathbf{r}_i of the industries [2].

The total mass of pollutant and the norm of solution of (1)-(5) obey the equations

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_D \phi \, d\mathbf{r} = \sum_{i=1}^N Q_i(t) - \int_D \sigma \phi \, d\mathbf{r} - \int_{S^+} U_n \phi \, dS \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_D \phi^2 \, d\mathbf{r} = 2 \sum_{i=1}^N Q_i(t) \phi(\mathbf{r}_i, t) - 2 \int_D (\sigma \phi^2 + \mu |\nabla \phi|^2) \, d\mathbf{r} - \int_S |U_n| \phi^2 \, dS \quad (7)$$

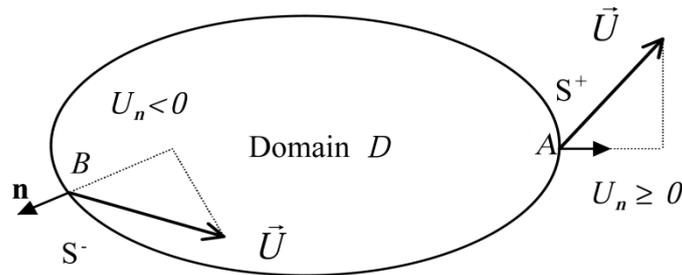


Fig. 1. Limited area D with open boundary $S = S^+ \cup S^-$

Equations (6) y (7) mean that the total mass and the norm increase under the influence of non-zero emission rates $Q_i(t)$, and decrease due to dissipation ($\sigma > 0$, $\mu > 0$) and adjective pollution flux through the domain boundary. If $f(\mathbf{r}, t) \equiv 0$ (emission rates are absent), and in addition, there is no dissipation ($\sigma = 0$, $\mu = 0$) and $U_n = 0$ everywhere at boundary S , then

$$\int_D \phi(t, \mathbf{r}) \, d\mathbf{r} = const, \quad \|\phi(t, \mathbf{r})\| = const$$

These two laws and equations (6) and (7) are useful in testing numerical algorithms and computational programs [2].

Direct and adjoint estimates

The solution of problem (1)-(5) give the concentration of pollutant in any point of domain $D \times (0, T)$. However, often we need to determine the contribution of each source to the pollution of a control zone. This is much simpler to do using the adjoint approach, widely used in the model sensitivity study and control theory [2].

The adjoint dispersion model in domain D and time interval $(0, T)$ is constructed with the help of an operator adjoint to that of model (1)-(5). The adjoint operator is defined by means of the Lagrange identity [2], and the adjoint model in $D \times (0, T)$ accepts the form

$$-\frac{\partial g}{\partial t} - \operatorname{div}(\mathbf{U}g) + \sigma g - \operatorname{div}(\mu \nabla g) = p(\mathbf{r}, t) \quad (8)$$

$$g(\mathbf{r}, T) = 0 \quad \text{in } D \quad (9)$$

$$\mu \frac{\partial g}{\partial n} + U_n g = 0 \quad \text{at } S^+ \quad (10)$$

$$\mu \frac{\partial g}{\partial n} = 0 \quad \text{at } S^-$$

Let $f(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}, t) = 0$. Then, after substitution $t' = T - t$, (8) differs from (1) only in the sign of speed \mathbf{U} , i.e., the parts S^- and S^+ of problems (1)-(5) and (8)-(10) are swapped. This explains the difference between (5) and (10). Note that adjoint problem is well posed only if it is solved in reverse time: from $t = T$ to $t = 0$ [2] (see “initial” condition (9) at $t = T$).

Let $\Omega \subset D$ be a control (ecologically sensible) zone. The integral

$$J(\phi) = \int_{T-\tau}^T \int_{\Omega} \phi(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} dt \quad (11)$$

is called *direct estimate* of mean concentration of $\phi(\mathbf{r}, t)$ in space-time domain $\Omega \times (T - \tau, T)$. The combination of problems (1)-(5) and (8)-(10) leads to an *adjoint estimate*

$$J(\phi) = \sum_{i=1}^N \int_0^T g(\mathbf{r}_i, t) Q_i(t) dt + \int_D g(\mathbf{r}, 0) \phi^0(\mathbf{r}) \quad (12)$$

The estimates (11) and (12) are equivalent and complement each other in monitoring the ecological state. Depending on the situation, one of these formulas may be preferable. The direct estimate (11) uses the solution $\phi(\mathbf{r}, t)$, and hence, problem (1)-(5) must be solved again whenever the number N of sources, their positions \mathbf{r}_i or emission rates $Q_i(t)$ vary. Thus, the direct evaluation is preferable if the pollution concentration is estimated in each point, or in many zones of domain D . However, in many cases, we need to know value $J(\phi)$ only in few control zones. Then it is better to solve adjoint model (8)-(10) for every control zone and use adjoint estimate (12). Besides, (12) allows evaluating the contribution of each pollution source into $J(\phi)$ and develop various strategies to control the emission rates of pollution sources.

Sensitivity of pollution estimates

Let the number K of zones $\Omega_k \subset D$ ($k = 1, \dots, K$) be much less than number N of pollution sources. Then adjoint estimates (12) are very effective in studying the sensitivity of concentrations $J_k(\phi)$ to variations in the emission rates $Q_i(t)$, positions \mathbf{r}_i and number N of the sources and in the initial distribution $\phi^0(\mathbf{r})$ of the contaminant. Indeed,

$$\delta J_k(\phi) = \sum_{i=1}^N \int_0^T g_k(\mathbf{r}_i, t) \delta Q_i(t) dt + \int_D g_k(\mathbf{r}, 0) \delta \phi^0(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (13)$$

$$\delta J_k(\phi) = \sum_{i=1}^N \int_0^T [g_k(\mathbf{r}'_i, t) - g_k(\mathbf{r}_i, t)] Q_i(t) dt \quad (14)$$

where $\delta J_k(\phi)$ is the variation in $J_k(\phi)$, while \mathbf{r}_i and \mathbf{r}'_i are two different positions of sources.

Optimal control of emission rates

Let us fix a control zone Ω , $\vec{Q}(t) = \{Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_N(t)\}$, and let

$$F(\vec{q}) = \|\vec{Q} - \vec{q}\|^2 = \sum_{i=1}^N \int_0^T (Q_i - q_i)^2 dt \quad (15)$$

be a functional defined in the domain

$$\Theta = \left\{ q_i(t) \in L_2[0, T]; q_i(t) \geq 0, (i=1, \dots, N) \mid J(\phi_{\vec{q}}) \leq J_0 \right\} \quad (16)$$

Thus Θ is the set of such emission rates $\vec{q}(t) = \{q_1(t), q_2(t), \dots, q_N(t)\}$ that guarantee the compliance with the air (water) quality standard J_0 in $\Omega: J(\phi) \leq J_0$. The optimal control consists in finding such new rates $\vec{Q}^*(t) \in \Theta$ that minimize the functional $F(\vec{q})$ in Θ :

$$F(\vec{Q}^*) = \inf F(\vec{q}) \quad \text{among all } \vec{q} \in \Theta \quad (17)$$

This variational problem is generally solved with an iterative optimization method using successive evaluation of the dynamic model \mathbf{M} [3]. This process is not very efficient because it requires many calculations due to the complexity model \mathbf{M} . Therefore, we now describe another method using the adjoint operator and allowing us to solve the problem of optimal control without consistent evaluation of model \mathbf{M} .

Note that the solution of problem (17) depends critically on the parameter

$$\alpha = J_0 - \int_D \mathbf{g}(\mathbf{r}, 0) \phi^0(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (18)$$

Indeed, for $\alpha < 0$ there is no solution to (17) because the sanitary norm will not be maintained even if all emissions are reduced to zero (i.e., any production activity will be discontinued).

Theorem 1. Let $\alpha = 0$. Then the optimal control problem (17) has only one solution

$$Q_i^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } t \in I_i \\ Q_i(t), & \text{if } t \in [0, T] \setminus I_i \end{cases}, \text{ where } I_i = \{t \in [0, T] \mid \mathbf{g}(\mathbf{r}_i, t) > 0\}.$$

Theorem 2. If $\alpha > 0$ then the optimal control problem (17) has a unique solution

$$\vec{Q}^* \in \Theta \text{ such that } Q_i^*(t) \leq Q_i(t) \quad (0 \leq t \leq T, 1 \leq i \leq N) \text{ and } J(\phi) = J_0.$$

Theorem 3. Suppose there is only one source with emission rate $Q(t)$ located at the point \mathbf{r}_0 . If $\alpha > 0$ and $J(\phi) > J_0$ then

$$Q^*(t) = Q(t) - \beta \mathbf{g}(\mathbf{r}_0, t), \quad \beta = (J(\phi_Q) - J_0) / \int_0^T \mathbf{g}^2(\mathbf{r}_0, t) dt \quad (19)$$

is the only solution of the optimal control (17) provided it is a nonnegative function in $[0, T]$.

An approximate solution to the problem of optimal control can be obtained with highly effective numerical algorithm of sequential orthogonal projections [3].

Four examples

We now apply the proposed control strategy. Let $D = (0, 2 \text{ km}) \times (0, 2 \text{ km})$ be a square domain, and let $\mathbf{r}_0 = (1.8, 0.2)$ be the position of a single source that emits lead particles. For simplicity, we neglect the initial distribution of lead: $\phi^0(\mathbf{r}) = 0$ in D . The coefficients of deposition and diffusion are $\sigma = 0.001 \text{ h}^{-1}$ and $\mu = 0.04 \text{ km}^2 \text{ h}^{-1}$. The non-divergent wind velocity $U = (u, v)$ is defined by the streamfunction $\Psi = xy$: $u = -\Psi_y = -x$, $v = \Psi_x = y$. The models (1)-(5) and (8)-(10) are considered in a four-hour interval $(0, T)$. The control zone is $\Omega = [0, 0.5] \times [0.5, 1.0]$, $\tau = T = 4 \text{ h}$ and the air quality norm is $J_0 = 1.5 \mu\text{g m}^{-3}$. Four original emission rates of the source with different time behavior are considered:

$$Q_1(t) = 3.8, \quad Q_2(t) = \begin{cases} 4, & 0 \leq t < 1 \\ 5-t, & 1 \leq t \leq 4 \end{cases}, \quad Q_3(t) = \cos \pi t + 3.5, \quad Q_4(t) = \begin{cases} 3, & 0 \leq t < 1 \\ \frac{2}{3}(t-1) + 3, & 1 \leq t \leq 4 \end{cases}$$

The mean lead concentrations $J_i(\phi)$ calculated in the zone Ω with each emission rate Q_i ($i=1, \dots, 4$) are $2.11 \mu\text{g m}^{-3}$, $2.02 \mu\text{g m}^{-3}$, $1.97 \mu\text{g m}^{-3}$ and $1.81 \mu\text{g m}^{-3}$, respectively. All results are unsatisfactory, since $J_i(\phi) > J_0$, ($i=1, 2, 3, 4$). In order to avoid violation of sanitary standards, we apply in all four cases the optimal

control (19). Figure 2 shows both the original emission rates $Q_i(t)$ and the optimal emission rates $q_{opti}(t) \equiv Q_i^*(t)$ given by the control (19). As it should be, for each i , the mean lead concentration $J_i(\phi)$ obtained with the optimal emission rate $q_{opti}(t)$ coincides with norm $J_0 = 1.5 \mu\text{g m}^{-3}$.

In complete agreement with the theory, $q_{opti}(t) \leq Q_i(t)$ for any $t \in (0, T)$, $i = 1, 2, 3, 4$. Besides, figure 2 shows that for each i , $q_{opti}(t) = Q_i(t)$ during the last hour ($3 \leq t \leq 4$) when $g(\mathbf{r}_0, t) = 0$, and due to (12), the source emissions do not contribute to the pollution of zone Ω . Also, due to (19), in the interval $0 \leq t < 3$, the rates $q_{opti}(t)$ and $Q_i(t)$ show the similar temporal behavior ($i = 1, \dots, 4$). This result is useful because it means that the optimal strategy (19) does not require radical changes in the operation of industrial enterprise.

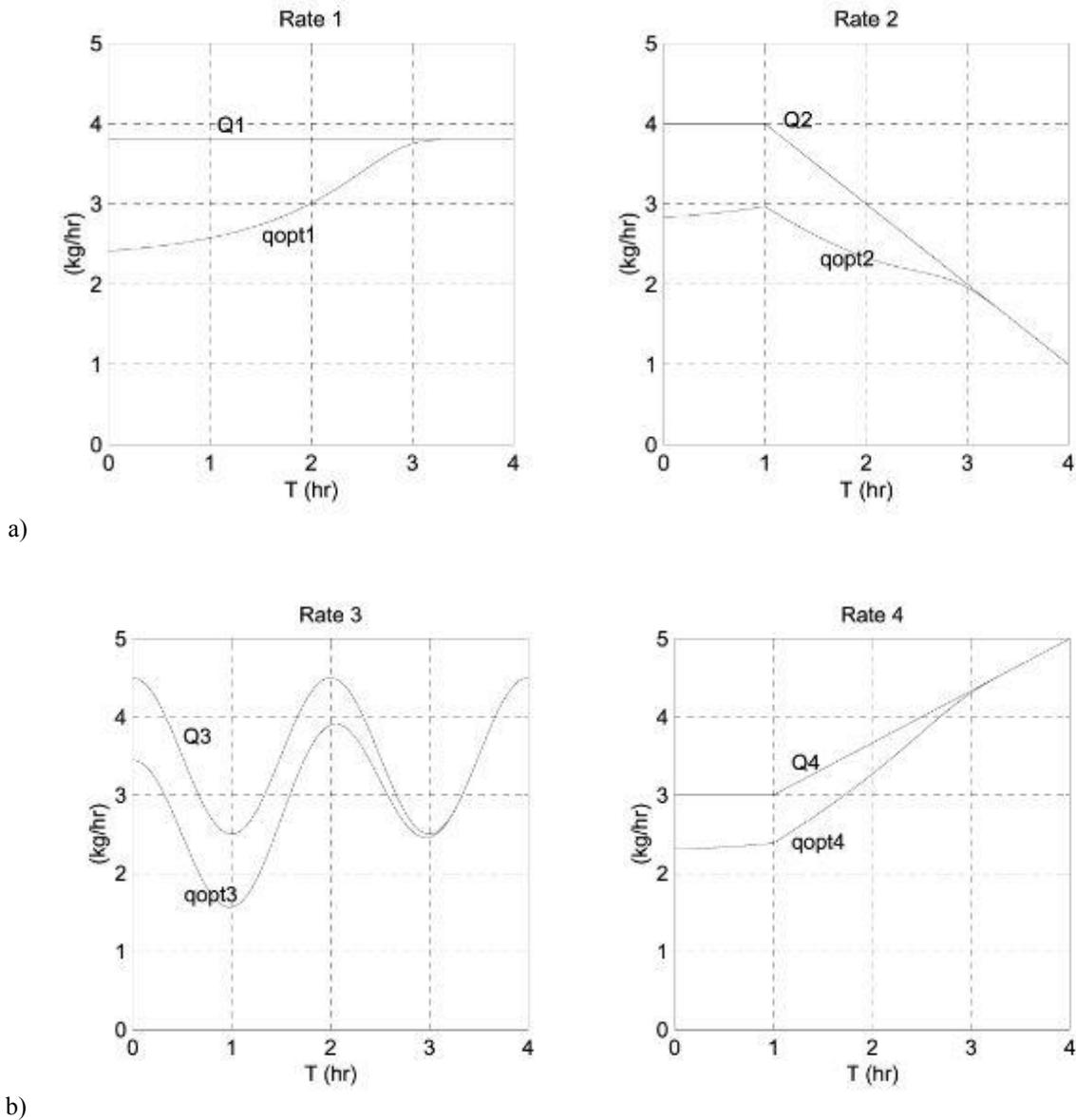


Fig. 2. Temporal behavior of original and optimal emission rates

Conclusions

The dispersion of quasi-passive contaminants in a limited area with open boundaries is considered, and optimal control of the pollutant emissions is proposed to prevent excessive concentrations of pollutants in control zones. The method is illustrated by simple examples of the air quality control. The adjoint approach can also be applied to such problems as the oil spill and bioremediation, the automobile emissions and identification of the industries that violate prescribed emission rates, the search of optimal location for the new industrial plant and estimation of the intensity of unknown pollution source if its position is known (the accident at the nuclear power station or chemical plant, nuclear testing or terrorist acts).

REFERENCES

1. K.Ya. Kondratyev (1988). *Climate Shocks: Natural and Anthropogenic*. NY, Wiley & Sons.
2. Yu.N. Skiba, D. Parra-Guevara (2015). *Application of Adjoint Equations to Problems of Dispersion and Control of Pollutants*. NY, Nova Science Publishers.
3. H. Elbern, H. Schmidt (1999). A four-dimensional variational chemistry data assimilation scheme for Eulerian chemistry transport modeling, *J. Geophys. Res.*, 104, 18583–18598.

Солдатенко С.А.* , Юсупов Р.М.

Об управлении климатом

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,
14 линия д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия
*E-mail: soldatenko@iias.spb.su

Изменение климата стимулирует разработку адаптационных мер, наиболее радикальной из которых является геоинжиниринг – крупномасштабное воздействие на климатическую систему. В статье рассмотрены основные методы геоинжиниринга и в рамках теории экстремальных задач дана формулировка задачи управления климатом Земли и приведен иллюстративный пример ее решения.

Ключевые слова: изменение климата, геоинжиниринг, управление климатом.

Sergei A. Soldatenko* , Rafael M. Yusupov

On the control of the Earth's climate system

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, 199178, St. Petersburg, Russia
*E-mail: soldatenko@iias.spb.su

Climate change encourages the development of adaptation measures, the most drastic of which is geoengineering – a large-scale intervention in the Earth's climate system. In the article, along with an examination of the basic methods of geoengineering, the Earth climate control problem is formulated within the framework of the theory of extremal problems and an illustrative example of its solution is given.

Keywords: climate change, geoengineering, control of the Earth's climate.

Введение

С достаточной степенью уверенности можно утверждать, что в наши дни проблема изменения климата приобрела статус глобальной, преодолеть которую человечеству будет чрезвычайно сложно [1]. Последние пять лет стали самыми теплыми за весь период инструментальных метеорологических наблюдений, ведущихся с 1850 года. Согласно докладу Всемирной метеорологической организации, представленному в сентябре 2019 года, среднеглобальная приповерхностная температура воздуха (СПТВ) уже превышает доиндустриальный уровень более, чем на 1°C. Парижское соглашение об изменении климата, принятое в 2015 году, призывает мировое сообщество удерживать СПТВ намного ниже 2°C сверх доиндустриального уровня и приложить усилия в целях удержания прироста СПТВ в пределах 1,5°C. Климат Земли неоднократно менялся в прошлом [2]. Причины этих изменений – многочисленные внутрисистемные и внешние факторы [3]. Однако современное изменение климата имеет по крайней мере две специфические особенности. Первое, скорость происходящих изменений – беспрецедентна: если в период с 1850 года по настоящее время СПТВ каждые 10 лет повышалась в среднем примерно на 0,07°C, то на рубеже третьего тысячелетия скорость роста СПТВ увеличилась более чем в два раза, достигнув значений 0,17°C за декаду [4]. Второе, решающую роль в этих изменениях играет деятельность человека [3]. В течение последнего миллиона лет объемное содержание атмосферного углекислого газа (CO₂), вклад которого в глобальное потепление составляет примерно 65%, варьировалось в пределах от 0,018 до 0,028%. За последние 150–200 лет, вследствие сжигания ископаемого топлива, усредненная объемная концентрация CO₂ в атмосфере выросла до рекордной отметки – 0,041% [5]. Степень достоверности имеющихся оценок относительно климатических трендов и определяющей роли антропогенного фактора в глобальном потеплении составляет 99,99995% [6]. Поскольку факты, подтверждающие глобальное потепление, вполне убедительны, возникает необходимость оценить возможные сценарии изменения климата под воздействием антропогенных факторов и на этой основе получить представление о влиянии изменения климата на природу и общество. Первая задача – оценка изменения климата в течение предстоящих нескольких десятилетий – решается с помощью климатических

моделей при заданных сценариях эмиссий парниковых газов (ПГ) [7, 8]. На настоящий момент такими сценариями являются RCP [9]. Современные климатические модели достаточно реалистично и вполне согласовано воспроизводят планетарный климат, хотя по ряду причин [10] получаемые в климатические проекции характеризуются довольно существенным межмодельным разбросом. Вторая проблема – оценка влияния изменения климата на природу и общество – исследуется с помощью математических моделей природных и социально-экономических систем и, в частности, посредством моделей комплексной оценки (integrated assessment models) [11].

Воздействие изменения климата на природу и общество является разнообразным и далеко идущим [3, 12]. Прежде всего, трансформируется сама окружающая среда (ОС): растет температура воздуха в нижней тропосфере и океане, повышается уровень моря, интенсивно тают арктические льды, закисляется океан, изменяются глобальный гидрологический цикл, циркуляция атмосферы и океана и, как следствие, частота и интенсивность опасных природных явлений. Это, в свою очередь, негативно влияет на устойчивость экосистем и биоразнообразие: ареалы обитания биологических видов смещаются, возрастают темпы их вымирания, потери биомассы в тропических лесах не компенсируются так называемым “глобальным озеленением” – ростом растительной биомассы лиственных и хвойных лесов в средних и субтропических широтах. Все это – предвестники надвигающейся биологической катастрофы. Наконец, изменение климата несет в себе неосознанные до конца риски для социально-экономических систем. Моделирование социально-экономического развития говорит о том, что многие отрасли экономики весьма чувствительно реагируют на изменение климата. Однако степень этой реакции остается недооцененной. Это обусловлено, во-первых, тем, что “неидеальность” климатических моделей и неоднозначность сценариев антропогенного воздействия на КС являются серьезными источниками неопределенности проекций климата, получаемых с помощью моделей. Во-вторых, отсутствие исторических сведений о взаимосвязи изменения климата и экономических процессов делают проблематичной оценку адекватности экономико-математических моделей, являющихся по большей части эмпирическими. Тем не менее, неоднозначные результаты, полученные посредством социально-экономических моделей, служат основой для разработки мер по адаптации к изменению климата. Эти меры сводятся, по-существу, либо к уменьшению уязвимости природных и антропогенных систем к неблагоприятным последствиям климатических изменений, либо к наказанию эмиттеров ПГ путем взывания с них углеродного налога. Переход к низкоуглеродной экономике, являющейся приоритетом в многочисленных политических программах, находится на настоящий момент в стадии планирования так как относительно данной концепции и ее реализации отсутствует ясность. Таким образом, адаптационные меры являются попыткой устранить следствие, но не причину глобального потепления. Сегодняшний климат в значительной степени определяет жизнепригодность нашей планеты. Усиливающееся антропогенное воздействие на ОС может привести к запредельной разбалансировке КС, при которой значительная часть планеты может стать непригодной для жизни человека. Даже зафиксированный Парижским соглашением рост температуры повлечет драматические последствия для природы и человека. Чтобы удержать потепление на уровне 1,5°C к 2030 году, уже сейчас эмиссии ПГ необходимо ежегодно сокращать на 7,6%, что является трудновыполнимой задачей. Радикальной адаптационной мерой, способной по мнению экспертного сообщества, стабилизировать климат на уровне, определенном Парижским соглашением, является геоинжиниринг – крупномасштабные воздействия на КС [13]. У этой концепции имеются многочисленные противники – явные мономаны, превратившие сокращение эмиссий ПГ в единственную цель климатической политики. Сокращение выбросов может дать положительный эффект лишь в долгосрочной перспективе, поскольку тепловая инерция КС настолько велика, что даже одномоментное прекращение эмиссий ПГ не остановит рост температуры в ближайшие десятилетия. Эффективность геоинжиниринга оценивается с помощью компьютерного моделирования при заданных сценариях эмиссий ПГ и сценариях воздействий на КС, несущих в себе значительный элемент субъективизма. Однако, еще в 1970-х годах одним из авторов данной работы была предложена единая методология планирования и реализации воздействий на ОС на основе теории управления и сформулированы теоретические основы геофизической кибернетики (ГФ) как науки об управлении процессами в геофизической среде [14]. В рамках ГФ геоинжиниринг рассматривается как экстремальная задача, решаемая при помощи методов оптимального управления (ОУ). В данной статье, наряду с рассмотрением основных методов геоинжиниринга, формулируется задача управления климатом Земли и приводится иллюстративный пример ее решения.

Материалы и методы

Известные методы геоинжиниринга можно разделить на две группы. Первая группа – манипулирование притоком солнечной радиации к КС – ставит своей целью уменьшить количество солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, что, естественно, не влияет на содержание ПГ в атмосфере. Данная цель может быть достигнута за счет инжекции в стратосферу мелкодисперсного аэрозоля, обладающего свойством слабо поглощать солнечное излучение в инфракрасной части спектра, и рассеивать солнечную радиацию в видимом диапазоне. Такими свойствами обладает, например, сульфатный аэрозоль. Другой способ уменьшения притока солнечной радиации – увеличение планетарного альбеда за счет установки орбитальных зеркал, впрыскивания морской воды в атмосферу для увеличения отражательной способности облаков, покрытия участков земной поверхности отражательным материалом и ряд других технологий аналогичного плана [15]. Вторая группа проектов нацелена на снижение содержания атмосферных ПГ либо за счет технологий, позволяющих непосредственно удалить ПГ из атмосферы, либо посредством проведения операций, создающих условия для естественного удаления атмосферных ПГ. Такими операциями могут, например, быть увеличение биомассы почвы и растительной биомассы в аридных зонах, стимулирование процесса фотосинтеза фитопланктоном за счет насыщения океана ионами железа, газоочистка воздуха с целью удаления из него углеродосодержащие соединения и др. В отдельную подгруппу выделяются геоинженерные проекты в Арктике, которая "нагревается" в два раза быстрее, чем в среднем планета (явление Арктического усиления). Цель этих проектов – уменьшить скорость таяния льда за счет, например, распыления пресной воды, в результате чего образуется слой поверхностного льда и, следовательно, увеличивается альбеда подстилающей поверхности, поскольку морская вода, в отличие от пресной, замерзает при температурах ниже нуля градусов по Цельсию. Оценка последствий геоинженерных проектов выполняется с помощью моделей климата при заданных субъективным образом сценариях преднамеренного воздействия на КС. Ввиду теоретически неограниченного количества возможных вариантов воздействия на КС метод перебора сценариев – не лучший прием. Нами предлагается иной подход к проблеме проектирования систем геоинжиниринга [16, 17]. С кибернетических позиций КС является замкнутой системой управления, что позволяет рассматривать проблему геоинжиниринга как экстремальную задачу, цель которой – отыскание экстремума некоторого функционала, формально описывающего цель управления при наличии ограничений, накладываемых на фазовые координаты и переменные управления. В этом случае оптимальный для заданного функционала закон управления и соответствующая ему фазовая траектория КС представляют собой решение экстремальной задачи, которая в наиболее общей форме формулируется следующим образом. Допустим, что реальной КС можно сопоставить абстрактный математический объект, называемый "идеальной" моделью КС, эволюция которой в пространственно-временной области $D_t = D \times [0, t_f]$ описывается системой многомерных дифференциальных уравнений в частных производных, учитывающих специфику КС как физической системы, а также характерные для нее процессы и циклы:

$$\partial q / \partial t = N(q, \alpha, u), \quad q(r, t)|_{t=0} = q_0(r), \quad (1)$$

где $q(r, t)$ – вектор состояния, r – вектор пространственных координат, t – время, N – нелинейный оператор, α – вектор параметров, u – вектор управлений, q_0 – известная вектор-функция. Вектор q является искомым решением уравнения (1).

Поскольку пространственно-временной спектр процессов, протекающих в КС, чрезвычайно широк, ни одна современная климатическая модель не в состоянии воспроизвести их в полной мере. Пусть τ – временной масштаб процессов, представляющих для нас основной интерес. Тогда явное описание процессов, временной масштаб которых существенно меньше τ , заменяется параметрическим. Придав некоторым компонентам вектора параметров смысл управлений, мы получаем формальную возможность управлять поведением КС. Обоснование и выбор управляющих параметров – самостоятельная задача, решаемая нами в рамках теории чувствительности [18]. Подчеркнем, что особенности КС как физической системы указывают на возможные пути управления ею [14, 17]. Континуальность КС обуславливает бесконечномерность вектора $q(r, t)$. Для построения системы с конечным числом степеней свободы и последующего использования методов теории управления для сосредоточенных систем, введем в пространстве вещественных функций, на котором определен вектор состояния, счетный базис $\{\psi_i\}$, так что $q(r, t)$ можно было представить в виде сходящегося по норме ряда $q(r, t) = \sum_{(i)} x_i(t) \psi_i(r)$. Подставляя это выражение в (1) и применяя затем процедуру типа Галеркина, мы получаем сосредоточенную систему, описываемую векторным обыкновенным дифференциальным уравнением:

$$dx/dt = f(x, u), \quad x(t)|_{t=0} = x_0. \quad (2)$$

В правой части уравнения (2) оставлены только параметры-управления, а остальные параметры опущены. Если управления зависят от состояния системы $u(t) = g(x(t))$, то уравнение (2) описывает управляемую систему с обратной связью, каковой является КС. Будем полагать, что система (2) управляема, а управления u принадлежат множеству допустимых управлений U . Это множество определяется исходя из физических соображений, принимая во внимание техническую реализуемость процесса управления КС. Задача управления состоянием КС сводится к синтезу закона управления, обеспечивающего достижение требуемой цели. Поскольку цель выражается в терминах экстремальных задач, то речь идет о синтезе ОУ. В наиболее общей форме данная задача формулируется следующим образом: найти совокупность допустимых управлений u^* и соответствующую траекторию КС x^* с тем, чтобы заданный целевой функционал $J(x, u)$ на временном интервале $t \in [0, t_f]$ достиг экстремума:

$$J(x, u) = \varphi(x(t_f), u(t_f)) + \int_0^{t_f} \Phi(x(t), u(t)) dt \rightarrow \text{extr}. \quad (3)$$

Уравнения (2) играют роль ограничений, дополняемые, в случае необходимости, ограничениями, накладываемыми в форме равенств и неравенств на переменные состояния и управления. Отметим, что целеполагание при управлении КС – задача нетривиальная, требующая специального рассмотрения. Для решения задачи (3) наиболее широко применяются методы вариационного исчисления, принцип максимума Понтрягина и динамическое программирование.

В качестве примера рассмотрим задачу управления КС посредством сульфатного аэрозоля, инжектируемого в стратосферу, вызывающего радиационный форсинг ΔQ . Будем полагать, что поведение управляемого объекта описывается энерго-балансовой моделью нулевой размерности [19]:

$$B_0 \tau (dT/dt) = (1 - \alpha_0) \Delta Q - (B_0/G) T + \Delta R, \quad (4)$$

где T – аномалия СПТВ, B_0 – эмпирический параметр линейной зависимости уходящего длинноволнового излучения от температуры, $\tau = C/B_0$ – время релаксации КС, C – эффективная теплоемкость системы "атмосфера – деятельный слой океана", α_0 – планетарное альbedo Земли, G – параметр "климатического усиления", ΔR – антропогенный радиационный форсинг, задаваемый линейной функцией $\Delta R = \eta t$ согласно RCP – сценариям. Управляемой переменной является альbedo аэрозольного слоя α_A , связанное с массой инжектируемого аэрозоля M_A линейной зависимостью $M_A = \alpha_A(Q_0/\beta_A k_A) S_E$, где Q_0 – инсоляция на верхней границе атмосферы, k_A – массовый коэффициент экстинкции аэрозоля, β_A – эмпирический параметр, S_E – площадь поверхности земного шара [20, 21]. Введем обозначения: $a = (G\tau)^{-1}$, $b = Q_0(1 - \alpha_0)/B_0\tau$, $c = \eta/B_0\tau$. С учетом этих обозначений уравнение (4) примет вид:

$$dT/dt = -aT - b\alpha_A + ct. \quad (5)$$

Задача ОУ КС состоит в нахождении управления $\alpha_A^*(t)$, доставляющее минимум функционалу, характеризующему массовый расход аэрозоля:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \alpha_A^2(t) dt \quad (6)$$

при ограничении (5), граничных условиях

$$T(0) = 0, \quad T(t_f) = T_f \quad (7)$$

и ограничениях на управление $0 \leq \alpha_A \leq U$. Если при $t \in [0, t_f]$ рост T также ограничен ($T \leq C_T$), то вводится условие дополнительной нежесткости $\mu(t)[C_T - T(t)] = 0$, где $\mu(t)$ – множитель Лагранжа. Гамильтониан, соответствующий рассматриваемой задаче ОУ, имеет вид: $H = -\alpha_A^2/2 + \lambda(-aT - b\alpha_A + ct)$, где λ – множитель Лагранжа.

Согласно принципу максимума, ОУ определяется из условия максимума функции H :

$$\partial H / \partial \alpha_A = -\alpha_A - b\lambda. \quad (8)$$

Гамильтониан принимает максимальные значения при $\alpha_A^*(t) = -b\lambda(t)$. Множитель Лагранжа λ определяется из сопряженного уравнения $\partial \lambda / \partial t = -\partial H / \partial T = a\lambda$. Таким образом, $\lambda(t) = C_1 e^{at}$, где C_1 –

постоянная интегрирования. Оптимальная траектория системы может быть получена в результате интегрирования уравнения (5) после подстановки в него ОУ:

$$T(t) = C_1 e^{at} (b/2a) + C_2 e^{-at} + ct/a - c/a^2. \quad (9)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 легко определяются из граничных условий (7).

На рис. 1 показаны графики оптимального альbedo аэрозольного слоя (левое окно) и соответствующая оптимальная аномалия температуры (правое окно) для всех RCP сценариев при отсутствии ограничений на управление и фазовую координату. Терминальное условие достаточно жесткое $-T_f = 0^\circ\text{C}$. Для самого "жесткого" сценария RCP8.5 в рассматриваемый период времени с 2020 по 2100 г. имеет место превышение уровня Парижского соглашения. Введение фазового ограничения $C_T = 1^\circ\text{C}$ стабилизирует рост СПТВ (рис. 2).

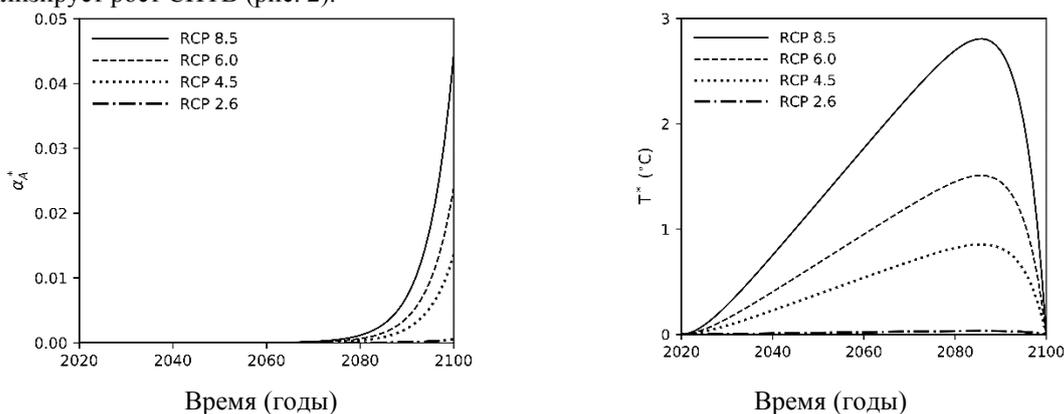


Рис. 1. Оптимальные альbedo аэрозольного слоя $\alpha_A^*(t)$ и фазовая траектория системы T^* для всех RCP сценариев при отсутствии ограничений на управление и фазовую переменную

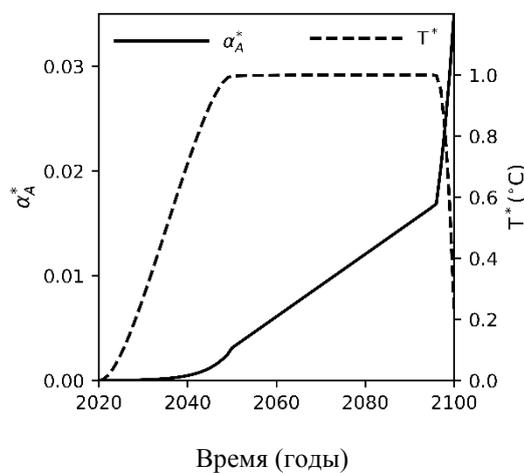


Рис. 2. Оптимальные альbedo аэрозольного слоя $\alpha_A^*(t)$ и фазовая траектория системы T^* для сценария RCP8.5 при ограничении на рост температуры $T \leq 1^\circ\text{C}$

Заключение

Проблема изменения климата стимулирует исследования в области геинжинирнга с целью стабилизации температуры воздуха в нижней тропосфере и предотвращения возможной биокатастрофы. Методы геофизической кибернетики, активно разрабатываемые авторами настоящей статьи, позволяют математически строго и корректно поставить и решить задачи преднамеренного воздействия на климат Земли, принимая во внимание ограничения на ресурсы, которыми располагает человек для достижения этой цели. В статье сформулирована постановка задачи оптимального управления климатом Земли и приведен пример ее решения. Дальнейшие исследования мы связываем с применением более сложных математических моделей КС и рассмотрением широкого спектра методов геинжинирнга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sachs J. et al. Sustainable Development Report 2019, Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN), New York, 2019, 64 p.
2. Bradley R. Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary, Elsevier, Oxford. 2015, 696 p.
3. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker T.F., Qin D., Platter G.-K. et al. (Eds.). Cambridge: Cambridge Uni. Press. 2013. 1535 p.
4. NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for December 2018, published online January 2019. URL: www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201812 (дата обращения 21.12.2019).
5. NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monthly Mean CO₂. URL: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html (дата обращения 21.12.2019).
6. Santer B.D., Bonfis C.J.W., Fu Q. et al. Celebrating the anniversary of three key events in climate change science // *Nature Climate Change*. 2019. V. 9. P. 180–182.
7. Foster P. Half a century of robust climate models // *Nature*. 2017. V. 545. P. 296–297.
8. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of the CMIP5 and the experimental design // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. V. 93. P. 485–498.
9. Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // *Climatic Change*. 2011. V. 109. P. 213–241.
10. Soldatenko S., Colman R. Climate variability from annual to multi-decadal timescales in a two-layer stochastic energy balance model: analytic solutions and implications for general circulation models // *Tellus A*. 2019. V. 71. 1554421.
11. Zheng Q. et al. Integrated assessment models of climate change economics. Singapore: Springer, 2017. 181 p.
12. Порфирьев Б.Н., Катцов В.М., Рогинко С.А. Изменение климата и международная безопасность. Москва, РАН, 2011, 291 с.
13. National Research Council. Climate intervention: Reflecting sunlights to cool Earth. Washington, DC: The National Academies Press. 2015. 260 p.
14. Гаскаров Д.В., Киселев В.Б., Солдатенко С.А., Строгонов В.И., Юсупов Р.М. Введение в геофизическую кибернетику / Под ред. Р.М. Юсупова. СПб: Изд-во СПбГУВК. 1998. 165 с. 017. 4615072.
15. Keith D. A case for climate engineering. Boston: MIT Press, 2013, 224 p.
16. Soldatenko S.A., Yusupov R.M. On the possible use of geophysical cybernetics in climate manipulation (geoengineering) and weather modification // *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2015. V. 11. P. 116-125.
17. Soldatenko S.A. Weather and climate manipulation as an optimal control for adaptive dynamical systems // *Complexity*. 2017. V. 2017. 4615072.
18. Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. О выборе управляющих параметров при моделировании целенаправленной модификации погодно-климатических процессов // *Труды СПИИРАН*. 2016. Вып. 1(44). С.153–180.
19. Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. Чувствительности нульмерной климатической модели и ее обратные связи в контексте проблемы управления погодой и климатом Земли // *Труды СПИИРАН*. 2017. Т. 52. С. 5–31.
20. Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. Оптимальное управление аэрозольными эмиссиями в стратосферу для стабилизации климата Земли // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. С. 566–574.
21. Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. Оптимальное управление процессом применения искусственных сульфатных аэрозолей для смягчения глобального потепления // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. С. 821–828.

Сухинов А.И.¹, Чистяков А.Е.¹, Никитина А.В.², Литвинов В.Н.^{1,3*}

Математическое моделирование гидродинамики и процессов переноса солей и тепла в мелководных водоёмах

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный технический университет»
Россия, 344000, Ростов-на-Дону, Площадь Гагарина, 1

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет»
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

³Азово-Черноморский инженерный институт - филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный аграрный университет»
в г. Зернограде
Россия, 347740, г. Зерноград, ул. Ленина, 21
*E-mail: LitvinovVN@rambler.ru

В работе приведено описание трехмерной математической модели гидродинамики мелководных водоёмов, учитывающей процессы переноса солей и тепла. Для аппроксимации уравнения диффузии – конвекции – реакции по времени использованы схемы с весами. Аппроксимация задачи расчета поля скорости движения водной среды по пространственным переменным выполнена на основе метода баланса с учетом коэффициентов заполненности контрольных областей. Исследованы стационарные режимы задачи переноса тепла и солей. На основе мониторинга водной акватории построены трехмерные математические модели движения водной среды, предназначенные для прогнозирования возможных сценариев развития экосистемы Азовского моря для избегания возникновения областей анаэробного заражения и принятия своевременных мер для их локализации. Приведено описание программного комплекса, позволяющего моделировать процессы гидродинамики мелководных водоемов со сложными геометрией и пространственными структурами течений с учетом транспорта тепла и солей.

Ключевые слова: трёхмерная модель, перенос тепла и солей, пространственное распределение концентраций.

**Alexander I. Sukhinov¹, Alexander E. Chistyakov¹, Alla V. Nikitina²,
Vladimir N. Litvinov^{1,3*}**

Mathematical modeling of hydrodynamics and processes of salt and heat transfer in shallow water bodies

¹Don State Technical University
Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1

²South Federal University
Russia, 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42

³Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University
Russia, 347740, Zernograd, Lenina Str., 21

*E-mail: LitvinovVN@rambler.ru

The work describes a three-dimensional mathematical model of the hydrodynamics of shallow reservoirs, taking into account the processes of salt and heat transfer. To approximate the equation of diffusion - convection - reaction in time, we used schemes with weights. The approximation of the problem of calculating the velocity field of the aquatic environment with respect to spatial variables is carried out on the basis of the balance method, taking into account the occupancy ratios of the control areas. The stationary modes of the heat and salt transfer problem are investigated. Based on the monitoring of the water area, three-dimensional mathematical models of the movement of the aquatic environment have been built, designed to predict possible scenarios for the development of the Azov

Sea ecosystem in order to avoid the occurrence of anaerobic infection areas and take timely measures for their localization. A description is given of a software package that allows modeling hydrodynamic processes in shallow water bodies with complex spatial structures of currents taking into account the transport of salts and heat.

Keywords: three-dimensional model, heat and salt transfer, spatial distribution of concentrations.

Введение

Решение актуальных задач расчёта площадей и объёмов зон загрязнения взвесью и другими примесями с целью эффективной оценки масштабов и интенсивности антропогенного воздействия на акваторию требует разработки качественной трёхмерной модели гидродинамики, учитывающей процессы переноса тепла и солей.

Среди научных публикаций российских ученых, исследования которых посвящены прогнозу водных экосистем, можно выделить труды Марчука Г.И. [1], Матишова Г.Г. [2], Сухинова А.И. [3, 4], Тютюнова Ю.В. [5], Якушева Е.В. [6], Ильичева В.Г. и др.

Отечественные и зарубежные программные комплексы, позволяющие выполнять моделирование процессов гидродинамики (SALMO, CHARISMA, MARS3D», СHTDM, CARDINAL, PHOENICS, ЭКОИНТЕГРАТОР и др.), не учитывают пространственную неоднородность движения водной среды, не обладают необходимой точностью моделирования вихревых структур течений, не являются консервативными, не учитывают сложную геометрию рельефов дна и берега, испарение, стоки рек, солёность, температуру и другие факторы, а также проявляют неустойчивость при значительных перепадах глубин и изменении плотности водной среды [7–11].

Материалы и методы

В основу разрабатываемой модели положена математическая модель гидродинамики мелководных водоёмов, представляющая собой совокупность уравнений движения (Навье – Стокса), неразрывности для случая переменной плотности, а также уравнения транспорта тепла и солей [12, 13]:

$$u'_t + uu'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho}P'_x + (\mu u'_x)'_x + (\mu u'_y)'_y + (\mu u'_z)'_z + 2\Omega(v\sin\vartheta - w\cos\vartheta), \quad (1)$$

$$v'_t + uv'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho}P'_y + (\mu v'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (v v'_z)'_z + 2\Omega u \sin\vartheta, \quad (2)$$

$$w'_t + uw'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho}P'_z + (\mu w'_x)'_x + (\mu w'_y)'_y + (v w'_z)'_z + 2\Omega u \cos\vartheta + g, \quad (3)$$

$$\rho'_t + (\rho u)'_x + (\rho v)'_y + (\rho w)'_z = 0, \quad (4)$$

$$T'_t + uT'_x + vT'_y + wT'_z = (\mu T'_x)'_x + (\mu T'_y)'_y + (vT'_z)'_z + f_T, \quad (5)$$

$$S'_t + uS'_x + vS'_y + wS'_z = (\mu S'_x)'_x + (\mu S'_y)'_y + (vS'_z)'_z + f_S, \quad (6)$$

где $\mathbf{V} = \{u, v, w\}$ – компоненты вектора скорости; P – полное гидродинамическое давление; ρ – плотность водной среды; μ, ν – горизонтальная и вертикальная составляющие коэффициента турбулентного обмена; $\Omega = \Omega \cdot (\cos\vartheta \cdot \mathbf{j} + \sin\vartheta \cdot \mathbf{k})$ – угловая скорость вращения Земли определяется выражением; ϑ – широта места; g – ускорение свободного падения; f_T, f_S – источники тепла и соли (находится на границе области).

Согласно методу поправки к давлению, исходная модель гидродинамики разбивается на три подзадачи. Первая подзадача представлена уравнением диффузии – конвекции – реакции, при помощи которого вычисляются компоненты поля вектора скорости на промежуточном слое по времени:

$$\frac{\tilde{u} - u}{\tau} + u\tilde{u}'_x + v\tilde{u}'_y + w\tilde{u}'_z = (\mu\tilde{u}'_x)'_x + (\mu\tilde{u}'_y)'_y + (v\tilde{u}'_z)'_z + 2\Omega(v\sin\theta - w\cos\theta),$$

$$\frac{\tilde{v} - v}{\tau} + u\tilde{v}'_x + v\tilde{v}'_y + w\tilde{v}'_z = (\mu\tilde{v}'_x)'_x + (\mu\tilde{v}'_y)'_y + (v\tilde{v}'_z)'_z - 2\Omega u \sin\theta, \quad (7)$$

$$\frac{\tilde{w} - w}{\tau} + u\tilde{w}'_x + v\tilde{w}'_y + w\tilde{w}'_z = (\mu\tilde{w}'_x)'_x + (\mu\tilde{w}'_y)'_y + (v\tilde{w}'_z)'_z + 2\Omega u \cos\theta + g \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right).$$

Для аппроксимации уравнения диффузии – конвекции – реакции по времени использованы схемы с весами. Здесь $\tilde{u} = \sigma\tilde{u} + (1 - \sigma)u$, $\sigma \in [0, 1]$ – вес схемы.

Расчет распределения давлений (вторая подзадача) базируется на уравнении Пуассона

$$p''_{xx} + p''_{yy} + p''_{zz} = \frac{\hat{\rho} - \rho}{\tau^2} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{u})'_x}{\tau} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{v})'_y}{\tau} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{w})'_z}{\tau}. \quad (8)$$

Значение поля скорости на верхней границе (поверхности водоема) задается следующим образом: $w = -\omega - p'_z / \rho g$. В качестве начального приближения для данной задачи использовалась упрощенная гидростатическая модель движения водной среды, что значительно уменьшает время расчета.

Третья подзадача позволяет по явным формулам определить распределение скоростей на следующем слое по времени

$$\frac{\hat{u} - \tilde{u}}{\tau} = -\frac{1}{\hat{\rho}} p'_{x'}, \quad \frac{\hat{v} - \tilde{v}}{\tau} = -\frac{1}{\hat{\rho}} p'_{y'}, \quad \frac{\hat{w} - \tilde{w}}{\tau} = -\frac{1}{\hat{\rho}} p'_{z'}, \quad (9)$$

где τ – шаг по временной координате, \tilde{u} – значение поля вектора скорости на предыдущем слое по времени, \tilde{u} – значение поля скорости на промежуточном слое по времени, \hat{u} – значение на текущем слое по времени.

Программная реализация трехмерной математической модели гидродинамики выполнена на равномерной сетке. Аппроксимация задачи расчета поля скорости движения водной среды по пространственным переменным выполнена на основе метода баланса с учетом коэффициентов заполненности контрольных областей.

Результаты

При решении задачи обработки гидрологической информации с помощью алгоритма распознавания получены изолинии солёности и температуры, на основе которых построены соответствующие карты для Азовского моря (рисунки 1, 2).



Рис. 1. Восстановленное поле солёности Азовского моря

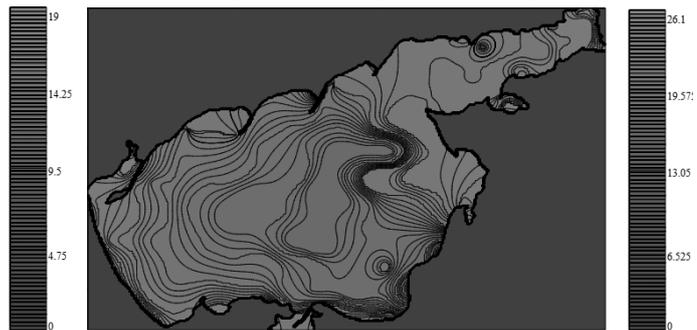


Рис. 2. Восстановленное поле температуры Азовского моря

В результате проведённых исследований разработан программный комплекс, позволяющий выполнить более точный расчет процессов гидродинамики с учетом транспорта солей и тепла в мелководных водоемах со сложными пространственными структурами течений. Программная реализация математических моделей учитывает силу Кориолиса, турбулентный обмен, испарение, стоки рек, ветровые течения и трение о дно, а также сложную геометрию береговой линии и дна водоёма. Расчетная область соответствует физическим размерам Азовского моря: длина равна 355 км, ширина равна 233 км, шаг по пространству в горизонтальном направлении 1000 м, временной интервал – 30 суток.

Для реконструкции экологической катастрофы была построена трехмерная математическая модель, описывающая гидрофизические процессы, происходящие в мелководных водоемах. На рисунке 3 приведены результаты численного моделирования движения водной среды в акватории Азовского моря на основе программного комплекса «Azov3d».

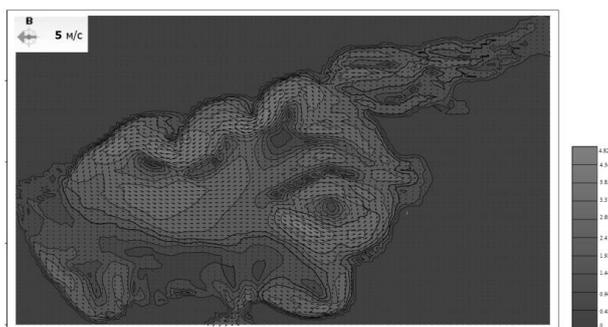


Рис. 3. Результаты математического моделирования движения водной среды (баротропные течения)

Основываясь на результатах экспедиционных измерений параметров водной среды, проведённых авторами в акватории Азовского моря с использованием акустического профилографа «ADCP Workhorse 600 Sentinel», можно утверждать, что существует участок, на котором происходят заморные явления, появление которого имеет сезонный характер. На рисунке 6 представлены результаты натуральных измерений профиля температуры, солёности и растворенного кислорода, полученные при помощи гидрофизического зонда «Sea Bird Electronics 19 Plus» на одной из экспедиционных станций. Из рисунка 4 видно, что содержание кислорода на глубине более 6,5 метров близко к нулю. На данной станции наибольшая область воды была подвергнута явлениям аноксии.

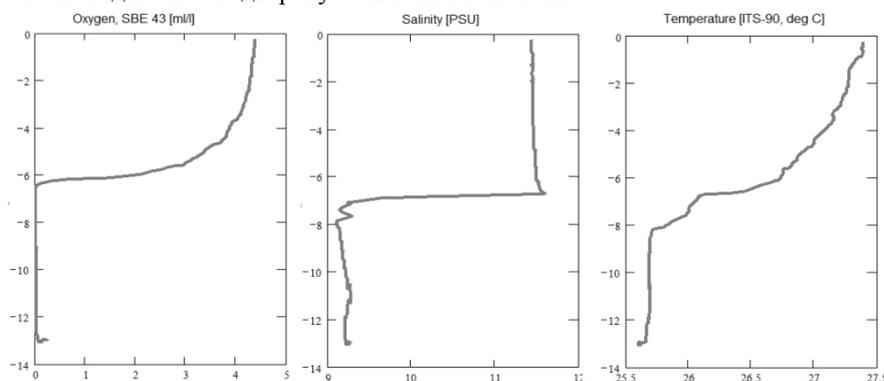


Рис. 4. Слева профиль растворенного кислорода [ml/l], справа – температуры [C], в центре – солёность [PSU]

Измерения проводились по вертикали, начиная, от ближней зоны чувствительности ADCP – зонда до дна. Изучено влияние изменения значений коэффициента вертикального турбулентного обмена на содержание растворенного кислорода в придонном слое мелководного водоема. Примерно на глубине 3 метров и ниже значения коэффициента вертикального турбулентного обмена близки к нулю, что означает пониженный турбулентный обмен по вертикали в данной области, объясняет явление гипоксии в придонном слое центрально-восточной части Азовского моря.

Заключение

Предложенная модель гидродинамики мелководных водоемов позволяет получить трехмерные поля вектора скоростей водного потока, давления, плотности морской воды, солёности, температуры. При разработке моделей гидродинамики мелководных водоемов использовались результаты экспедиционных измерений. Производились замеры скоростей течения водного потока на основе зонда ADCP, измеряющего мгновенные значения вертикального профиля вектора скорости. Для фильтрации натуральных данных применялся алгоритм фильтра Калмана. Из сопоставления результатов моделирования и натуральных измерений коэффициента вертикального турбулентного обмена на различных горизонтах водоема, сделан вывод о том, что результаты расчетов турбулентных процессов в мелководных водоемах на основе подсеточной модели турбулентности Смагоринского лучше всего согласуются с натурными данными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-07-00623).

ЛИТЕРАТУРА

1. Марчук Г.И. Динамика океанских приливов / Г.И. Марчук, Б.А. Каган. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. – 359 с.
2. Матишов Г.Г. Об оптимальной эксплуатации водных ресурсов. Концепция внутренних цен / Г.Г. Матишов, В.Г. Ильичев // Докл. АН, 2006, Т. 406, № 2, С. 249–251.
3. Sukhinov, A.I. Supercomputer Modeling of Hydrochemical Condition of Shallow Waters in Summer / A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, A.V. Nikitina, Y.V. Belova, V.V. Sumbaev, A.V. Semenyakina // Communications in Computer and Information Science. – 2018. – Vol. 910. – P. 336–351.
4. Gushchin, V.A. A Model of Transport and Transformation of Biogenic Elements in the Coastal System and Its Numerical Implementation / V.A. Gushchin, A.I. Sukhinov, A.V. Nikitina, A.E. Chistyakov, A.A. Semenyakina // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2018. – Vol. 58. – P. 1316–1333.
5. Tyutyunov, Yu.V. Simple models for studying complex spatiotemporal patterns of animal behaviour / Yu.V. Tyutyunov, L.I. Titova // Deep-Sea Research Part II. – 2017. – P. 193–202.
6. Yakushev, E.V. Mathematical modeling of the influence of marine biota on the carbon dioxide ocean-atmosphere exchange in high latitudes / E.V. Yakushev, G.E. Mikhailovsky // Air-Water Gas Transfer, Sel. Papers, Third Int. Symp. (Germany: AEON Verlag Studio Hanau) ed. by B. Jaehne and E.C. Monahan, 1995. – P. 37–48.
7. Marchesiello, P. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models / P. Marchesiello, J.C. McWilliams, A. Shchepetkin // Oceanic Modelling Journal, 2001. – Vol. 3. – P. 1–20.
8. Андросов А.А. Проливы мирового океана. Общий подход к моделированию / А.А. Андросов, Н.Е. Вольцингер. – Санкт-Петербург: Наука, 2005. – 171 с.
9. Tran, J.K. A predator-prey functional response incorporating indirect interference and depletion / Verh. Internat. Verein. Limnol, 2008. – Vol. 30. – P. 302–305.
10. Alekseenko, E. Coastal hydrodynamics in a windy lagoon / E. Alekseenko, B. Roux, A.I. Sukhinov, R. Kotarba, D. Fougere // Computers and Fluids, 2013. – Vol. 77. – P. 24–35.
11. Nikitina, A.V. Modeling of production and destruction processes in coastal systems on a supercomputer / A.V. Nikitina, L.V. Kravchenko, I. Semenov, Y.V. Belova, A.A. Semenyakina // MATEC Web of Conference, 2018. – Vol. 22. – P. 226.
12. Белоцерковский, О.М. Турбулентность. Новые подходы / О.М. Белоцерковский, А.М. Опарин, В.М. Чечеткин. – М.: Наука, 2003. – 286 с.
13. Sukhinov, A.I. Predictive modeling of coastal hydrophysical processes in multiple-processor systems based on explicit schemes / A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, A.V. Shishenya, E.F. Timofeeva // Mathematical Models and Computer Simulations, 2018. – Vol. 10(5). – P. 648–658.

Сухинов А.И.¹, Чистяков А.Е.^{1*}, Кузнецова И.Ю.², Проценко Е.А.³
Моделирование процесса транспорта донных материалов
в русловых потоках

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный технический университет»
Россия, 344000, Ростовская область, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1
*E-mail: cheese_05@mail.ru

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Южный федеральный университет»
Россия, 344006, Ростовская область, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42

³Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)»
Россия, 347936, Ростовская область, Таганрог, ул. Инициативная, д. 48

В работе представлена пространственно-двумерная модель транспорта донных материалов в русловых потоках с гидродинамической составляющей, что позволяет предсказывать динамику изменения рельефа дна за счет движения воды и твердых частиц, и учитывать пористость грунта, критическое значение касательного напряжения, при котором начинается перемещение наносов, турбулентный обмен, динамически изменяемую геометрию дна, ветровые течения и трение о дно. Для численного решения задачи диффузии-конвекции при больших сеточных числах Пекле разработана разностная схема, построенная на основе линейной комбинации разностной схемы «кабаре» и «крест» с весовыми коэффициентами, полученными в результате минимизации погрешности аппроксимации при малых значениях числа Куранта. Рассчитан диапазон чисел Пекле, при котором предложенная аппроксимация оператора конвективного переноса будет эффективна. В качестве практического примера применения предложенных схем рассмотрена задача дампинга грунта.

Ключевые слова: схема «кабаре»; схема «крест»; большие значения сеточного числа Пекле; задача дампинга грунта.

Alexander I. Sukhinov¹, Alexander E. Chistyakov^{1*}, Inna Y. Kuznetsova²,
Elena A. Protsenko³

Modeling of transport process of bottom materials in channel flows

¹Don State Technical University,

Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1

*E-mail: cheese_05@mail.ru

²Southern Federal University,

Russia, 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42

³A.P. Chekhov University of Taganrog (branch of Rostov State University of Economics),

Russia, 347936, Taganrog, Initiative Str., 48

The paper presents a spatial two-dimensional model of the transport of bottom materials in channel flows which includes a hydrodynamic component that allows to predict the dynamics of changes in the bottom topography due to the movement of water and solid particles and takes into account the porosity of the soil, the critical value of the shear stress at which sediment movement begins, turbulent exchange, dynamically changing bottom geometry, wind currents, and bottom friction. For the numerical solution of the diffusion-convection problem at large grid Peclet numbers, a difference scheme is developed. This scheme is constructed built based on a linear combination of the Upwind and Standard Leapfrog difference schemes with weight coefficients obtained by minimizing the approximation error for small Courant numbers. A range of grid Peclet numbers is calculated at which the proposed approximation of the convective transport operator will be effective. The problem of soil dumping was considered as a practical example of the application of the proposed schemes.

Keywords: Upwind Leapfrog difference scheme; Standard Leapfrog difference scheme; large Peclet number; the problem of soil dumping.

При численном решении задач транспорта взвесей в мелководных водоемах на основе центрально-разностных схем возникает проблема, связанная с падением точности для больших значений сеточного числа Пекле [1]. Одним из вариантов решения данной проблемы является измельчение шага по пространственной сетке, что влечет за собой увеличение трудоемкости. Например, при решении трехмерной задачи диффузии-конвекции для уменьшения числа Пекле в два раза необходимо уменьшить шаги по пространству в два раза, а по времени в четыре раза. Таким образом, трудоемкость возрастает в 32 раза. Другим подходом к решению данного класса задач является применение других разностных схем, например, схемы «кабаре» [2, 3]. Но при этом схемы «крест» и «кабаре» показали низкую точность при решении модельных задач [1]. Рассмотрению различных модификаций схемы «кабаре» был посвящен ряд работ, в том числе [4], в которой было предложено использовать весовые множители для ликвидации осцилляций при решении нелинейной задачи переноса.

Разностная схема

Рассмотрим разностную схему, представляющую собой линейную комбинацию разностной схемы «кабаре» и «крест» с весовыми коэффициентами 2/3 и 1/3 соответственно [1]

$$\begin{aligned} \frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\tau} + 2 \frac{q_{i-1}^n - q_{i-1}^{n-1}}{3\tau} + \frac{q_i^n - q_i^{n-1}}{3\tau} + u \frac{q_{i+1}^n + 4q_i^n - 5q_{i-1}^n}{3h} &= 0, \quad u \geq 0; \\ \frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\tau} + 2 \frac{q_{i+1}^n - q_{i+1}^{n-1}}{3\tau} + \frac{q_i^n - q_i^{n-1}}{3\tau} + u \frac{5q_{i+1}^n - 4q_i^n - q_{i-1}^n}{3h} &= 0, \quad u \leq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Стоит отметить, что при линейной комбинации двух схем с близкими свойствами часто происходит взаимная компенсация ошибок аппроксимации, и при этом полученная в результате схема обладает лучшими свойствами, чем исходные схемы.

Схема (1) имеет локальную погрешность аппроксимации относительно фиктивного узла $(i-1/3, n)$ равную $(c(1-c)/6)uh^2q_{xx} + O(h^3)$ или $O(ch^2)$, поэтому при малых значениях числа Куранта схему (1) предпочтительней использовать, чем исходные схемы «кабаре» и «крест», погрешности аппроксимаций которых равны $O(h^2)$.

Модельная задача. Требуется найти решение уравнения переноса

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad u = 0,5 \text{ м/с}, \quad 0 \leq t \leq T, \quad 0 \leq x \leq L, \quad q(t, 0) = 0$$

с начальными условиями $q^0(x) = \theta(20-x) - \theta(10-x)$, где $\theta(x)$ – функция Хэвисайда.

На рис. 1 представлена зависимость погрешности численного решения модельной задачи на основе схемы (1) и схем «крест» и «кабаре» с ограничителями в зависимости от значений числа Куранта. Параметры модели: длина временного интервала – 100 с, шаг по времени τ принимал значения от 0,02 с до 2 с. Числа Куранта находятся в диапазоне от 0.01 до 1. Подробное исследование предложенной схемы представлено в [1, 5, 6].

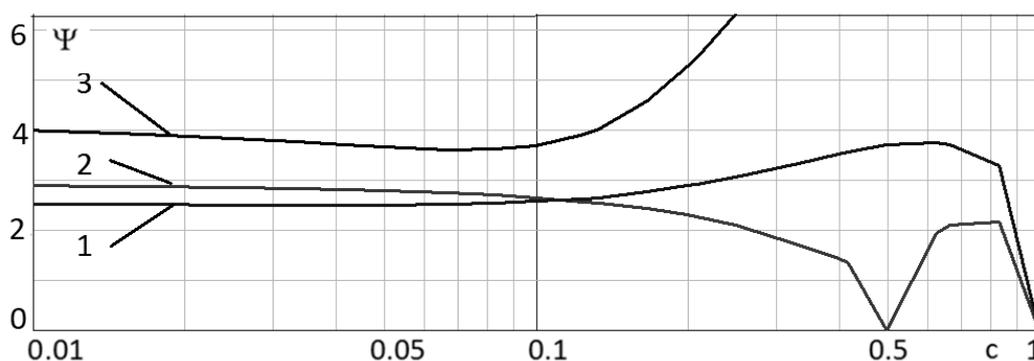


Рис. 1. Погрешность численного решения модельной задачи в зависимости от значений чисел Куранта

Математическая модель транспорта взвешенных частиц при дампинге грунта базируется на уравнении диффузии-конвекции, которое можно записать в виде:

$$c'_t + (uc)'_x + (vc)'_y + ((w + w_g)c)'_z = \mu(c''_{xx} + c''_{yy}) + (vc'_z)'_z + f, \quad (2)$$

где c – концентрация примеси; $\vec{V} = \{u, v, w\}$ – составляющие поля вектора скорости; w_g – скорость осаждения взвеси в вертикальном направлении; μ , ν – горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии; f – функция, описывающая интенсивность распределения источников загрязняющих веществ.

Добавим уравнению (2) граничные условия:

$$c'_n = 0, \quad (\vec{V}, \vec{n}) \leq 0; \quad \mu c'_n + w_g V_n = 0, \quad (\vec{V}, \vec{n}) > 0,$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к границе расчетной области; V_n – нормальная составляющая вектора скорости. При этом для расчета компонент вектора скорости движения водной среды использована трехмерная модель гидродинамики мелководных водоемов [7].

Исходными данными моделирования распространения взвешенных частиц при дампинге грунта являются: глубина водоема 10 м; объем загрузки 741 м³; скорость течения 0,2 м/с; скорость осаждения 2,042 мм/с (по Стоксу); плотность грунта 1600 кг/м³; процентное содержание пылеватых частиц ($d < 0,05$ мм) в песчаных грунтах – 26,83 %. Параметры расчетной области: длина – 3 км; ширина – 1,4 км; шаг по горизонтальной пространственной координате – 20 м; шаг по вертикальной пространственной координате – 1 м. На рис. 2 приведена динамика изменения концентрации взвешенных частиц (мг/л) с течением времени. Расчетный интервал составлял 15 мин; 30 мин; 1 ч; 2 ч соответственно. Течения направлены слева на право.

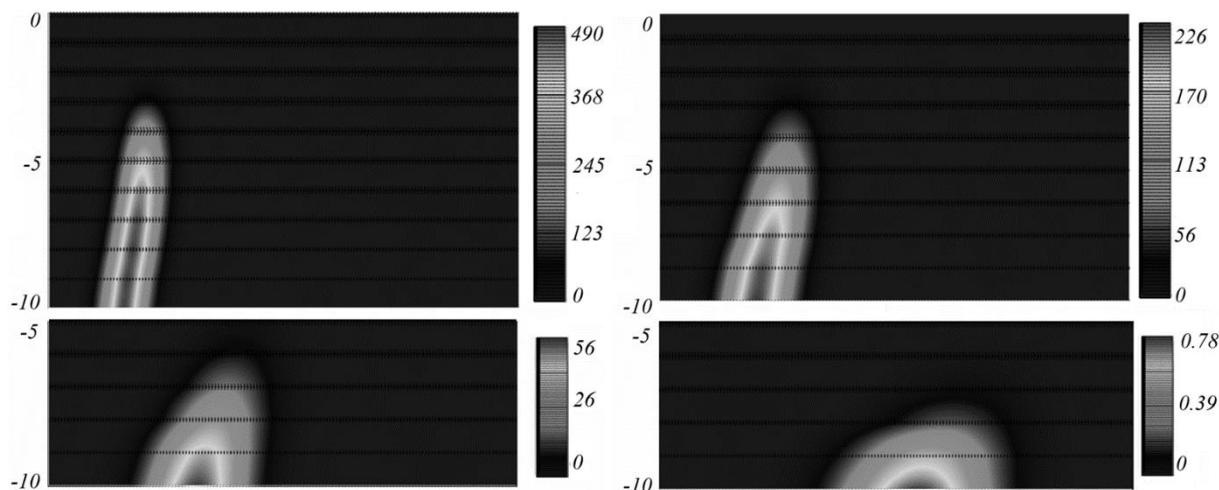


Рис. 2. Поле концентрации взвешенных частиц через 15 мин; 30 мин; 1 ч; 2 ч после момента выгрузки трюма

Более подробное описание пространственно-двумерной модели транспорта донных материалов, позволяющей предсказывать динамику изменения рельефа дна, а также описание программного комплекса представлены в [5, 6].

Заключение

В работе представлена разностная схема, построенная на основе линейной комбинации разностной схемы «кабаре» и «крест» с весовыми коэффициентами 2/3 и 1/3 соответственно. На основе решения тестовых задач гидродинамики показано, что при малых числах Куранта предложенную схему предпочтительнее использовать, чем исходные схемы «кабаре» и «крест».

Представленная в статье математическая модель транспорта взвешенных частиц позволяют спрогнозировать распространение шлейфов взвеси в водной среде и изменение рельефа дна в связи с выпадением взвешенных частиц грунта в осадок. Произведенные расчеты позволили рассмотреть

возможность оптимизации площадей существующих отвалов грунта, что в свою очередь позволит минимизировать ущерб, наносимый биотопам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00623.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. О разностных схемах кабре и крест // Вычислительные методы и программирование. – 2019. – 20:2 – С. 170–181.
2. Iserles A. Generalized Leapfrog Methods // IMA Journal of Numerical Analysis. – 1984. – 6(4). – DOI: 10.1093/imanum/6.4.381.
3. Головизнин В.М., Самарский А.А. Разностная аппроксимация конвективного переноса с пространственным расщеплением временной производной // Математическое моделирование. – 1998. – Т. 10, №1. – С. 86–100.
4. Laevsky Yu.M., Kandryukova T.A. On Approximation of Discontinuous Solutions to the Buckley–Leverett Equation // Numerical Analysis and Applications. – 2012. – 5:3. – P. 222–230.
5. Chistyakov A.E., Atayan A.M. Linear combination of the Upwind and Standard Leapfrog difference schemes with weight coefficients obtained by minimizing the approximation error // Computational Mathematics and Information Technologies. – 2019. – 3:2 – P. 54–66.
6. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Кузнецова И.Ю., Проценко Е.А. Моделирование движения взвешенных частиц в русловых потоках // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 11–13 ноября 2019 г.). – 2020. – С. 1102–1109.
7. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Алексеенко Е.В. Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23, № 3. – С. 3–21.

Филатов Н.Н.

Вклад академика К.Я. Кондратьева в лимнологию

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия, 185030, А. Невского, 50
E-mail: nfilatov@rambler.ru

Рассматривается вклад академика К.Я. Кондратьева в развитие лимнологии (озероведения). За достаточно короткий срок работы в области лимнологии (чуть более 10 лет) им была создана в ИНОЗ АН СССР лаборатория дистанционных методов, школа лимнологов – специалистов по дистанционным методам исследований озер, разработаны новые методы оценки параметров, качества озерных вод, выявлены закономерности термогидродинамических процессов, которая получила мировую известность. Под руководством К.Я. Кондратьева проведены международные эксперименты в рамках программы «Интеркосмос», организованы крупные многоуровневые эксперименты с использованием спутников, самолетов-лабораторий, вертолетов, наземных и судовых наблюдений на озерах Ладожском, Онежском, Севан и др. Вместе с академиками Г.И. Марчуком, А.С. Саркисяном, К.Я. Кондратьев в рамках крупной программы «Разрезы», основная задача которой – изучение энергоактивных зон океана, были организованы работы по подпрограмме «Озеро как модель океана», в рамках которой было показано, что именно по данным, собранным на озерах, можно эффективно проводить интеркалибрацию моделей термогидродинамики океана, параметров качества вод. За выдающиеся исследования оптических свойств вод крупных озер в 1992 г. вместе с профессором Д.В. Поздняковым и двумя канадскими учеными К.Я. Кондратьев был награжден престижной премией Чендлера-Мизенера, присуждаемой Международной ассоциацией исследований Великих озер. По инициативе академика изданы обобщающие монографии по разработке новых подходов и применению дистанционных методов в лимнологии, которые были опубликованы как в нашей стране, так и за рубежом в издательстве Springer-Praxis.
Ключевые слова: дистанционные методы, озера, Интеркосмос, качество вод.

N.N. Filatov

Contribution of Academician K.Ya. Konratyev to Limnology

Institute of Water Problems of the North, KarRC RAS,
Federal Research Center "Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences",
Petrozavodsk, Russia, 185030
E-mail: nfilatov@rambler.ru

The contribution of academician K. Ya. Kondratiev in limnology is considered. It is shown that for a fairly short period of work in limnology (a little more than 10 years) he created a laboratory of remote sensing methods in the Institute of Limnology of the Academy of Sciences of the USSR, he developed a school of limnologists which gained world fame. Under the leadership of K. Ya. Kondratiev were conducted international experiments within the framework of the Program "Intercosmos", organized several large multi-level experiments using satellites, airborne laboratories, helicopters, ground and research's vessel observations on the lakes Ladoga, Onego, Sevan and many others. Together with academicians G. I. Marchuk, A. S. Sarkisyan, K. Ya. Kondratyev, within the framework of the large-scale program "Sections," whose main task aim is to study the energy-active zones of the World ocean, organized work on the sub-program "Lake as an Ocean Model," in which we showed that it is precisely from the data collected on the lakes that intercalibration can be carried out models of thermohydrodynamics of the ocean, water quality parameters. For outstanding research on the optical properties of the waters of large lakes in 1992, together with Professor D. V. Pozdnyakov and two Canadian scientists K. Ya. Kondratyev was awarded by prestigious Chandler-Misener Prize awarded by the International Association for the Great Lakes Research. At the initiative of the academician Kondratyev several monographs on the development of new approaches and applying of remote sensing methods in limnology were published in our country and abroad by Springer-Praxis.

Keywords: remote sensing, lakes, Intercosmos, water quality.

Академик Кирилл Яковлевич Кондратьев перешел в Институт озераедения АН СССР из ГГО в 1982 г., и возглавил лабораторию дистанционных методов. Вместе с ним в институт пришли несколько его коллег-физиков (Д.В. Поздняков, В.В. Мелентьев, Л.П. Бобылев). В свою лабораторию он пригласил также ряд сотрудников ИНОЗ (В.Б. Румянцева, Г.В. Дружинина О.Е. Короткевича, Н.Н. Филатова, Л.В. Зайцева, М.А. Науменко и ряд других специалистов). За достаточно короткий срок работы лаборатории дистанционных методов – единственной специализированной лаборатории дистанционных методов в лимнологическом учреждении СССР, были получены выдающие результаты. Взявшись за новое для себя дело – озераедение (лимнологию), Кирилл Яковлевич за короткий срок внес крупный вклад в ее развитие. Благодаря авторитету академика в институт озераедения приезжали известные специалисты, ученые, космонавты из разных стран и из нашей страны. В те годы авторитет советской науки был очень высок, и не только в области космонавтики, изучения Земли из космоса, но и океанологии, гидрологии и лимнологии и др. Иностранные ученые с удовольствием соглашались опубликовать в СССР свои книги на русском языке. В конце 1980-х годов по инициативе Кирилла Яковлевича и под его редакцией была переведена на русский и опубликованы в издательстве Гидрометеиздат книги известных английских ученых Хендерсона-Селлера и Маркланда «Умирающие озера», Хендерсона-Селлера «Инженерная лимнология» [1, 2] и ряд др. А наши книги издавались за рубежом.

Академиком Кондратьевым было организовано несколько крупных многоуровневых экспериментов (спутники, самолеты, вертолеты, наземные и судовые наблюдения) с использованием дистанционных аэрокосмических методов на озерах Ладожском, Онежском, Севан. В 1986–1988 гг. под руководством К.Я. Кондратьева был проведен уникальный международный эксперимент на Рыбинском водохранилище и его водосборе по международной программе «Интеркосмос» по Международному целевому комплексному проекту «Изучение состояния и динамики экосистем внутренних водоемов с применением аэрокосмических методов».

В лаборатории разрабатывались, внедрялись, совершенствовались новые методы дистанционного зондирования температуры воды, сплоченности льда в СВЧ-диапазоне на основе многоканальных спектрально-поляризационных измерений. В институте была организована летающая лаборатория на базе вертолета, на котором была установлена уникальная аппаратура, в том числе и лидар, позволявший дистанционно определять концентрацию хлорофилла «а» и другие параметры качества воды в разных типах водоемов. Эту работу организовал профессор Д.В. Поздняков, с которым К. Я. Кондратьев много лет вместе работал и опубликовал несколько монографий и много статей [3, 4]. За работу по сравнительному анализу оптических свойств вод Великих американских озер и наших Ладожского и Онтарио в 1992 г. вместе с профессором Д.В. Поздняковым и двумя канадскими учеными К.Я. Кондратьев был награжден престижной международной премией Чендлера-Мизенера Международной ассоциации исследований Великих озер [5, 6]. В 1987 г по инициативе Кирилла Яковлевича в издательстве «Наука» сотрудниками лаборатории дистанционных методов была опубликована одна из первых в СССР книг по дистанционному мониторингу озер [7].

В 1980-е годы в АН СССР активно осуществлялась программа «Разрезы», руководил ею тогда Президент Академии Наук СССР, академик Г.И. Марчук – университетский однокашник и друг Кирилла Яковлевича. Кирилл Яковлевич Кондратьев, прочитав книжку «Динамика озер» [8], пришел к выводу, что озеро в определенном смысле может рассматриваться и как аналог, модель океана и ряд проблем по программе «Разрезы» можно исследовать в озерах в более контролируемых условиях, чем в океане. Он инициировал написание коллективной монографии и ряд статей «Озеро как имитационная модель океана» [9, 10], в которых было показано, что ряд задач, по отработке дистанционных методов зондирования, калибрации и верификации математических моделей, разрабатываемых по программе «Разрезы», можно проводить на озерах в более контролируемых условиях, чем в океане. Для подготовки данных для верификации моделей нами были проведены гидрологические съемки Онежского и Ладожского озер и осуществлены многоуровневые эксперименты с использованием судов, спутников и самолета–лаборатории ПИНРО (рук. В.И. Черноок) на Онежском озере. Таких синхронных подробных съемок крупного стратифицированного озера нет больше ни на одном крупном стратифицированном озере мира.

В 1986 г. сотрудники лаборатории дистанционных методов приняли участие в решении проблемы озера Балхаш. Для того, что бы спасти пресноводную часть озера, была выдвинута идея отрезать Восточный Балхаш путем строительства дамбы, оставив эту часть на еще большее осолонение при сильном испарении и почти без пресного стока. Такой отрицательный опыт уже был – с «отрезанием» Кара-Богаз-Гола от Каспия. Для изучения использовали не только контактные, но и дистанционные наблюдения этого озера. В

результате было показано нецелесообразность очередного отрезания части водоема. Начали мы в лаборатории Кирилла Яковлевича работы и по Аральскому морю. Он получил космоснимки этого водоема на разных стадиях его деградации, готовил туда экспедицию, которая по разным причинам не состоялась.

В 1980-х годах в Ленинграде активно обсуждался вопрос влияния строительства защитной дамбы от наводнений на экосистему Невской Губы. Решением партии и правительства она уже строилась, казалось, обсуждать было уже нечего, но надо помнить, что в конце 80 г. шла «перестройка». В те годы появились так называемые противники и сторонники дамбы. Зачастую дискуссии, споры возникали в обществе ради зарабатывания политического капитала, а не ради научной истины. Кирилл Яковлевич всегда был чужд политиканства, он не принимал участия в бесплодных дискуссиях, спорах и склоках, которых было много в то время, в том числе и в научной среде в некоторых академических институтах. Он утверждал только то, что подтверждалось научными результатами. Так вот, Кирилл Яковлевич получил от коллег американские спутниковые снимки Восточной части Финского залива, сделанные до строительства дамбы, и на тот момент, когда дамба была частично построена, и мы вместе с ним выполнили их дешифрирование. Результаты были опубликованы в 1988 г. в «Докладах Академии Наук» [11]. В работе было показано, что в то время, когда строительство дамбы близилось к завершению, сток вод из губы осуществлялся главным образом через южную часть дамбы по трассе морского канала. Интенсивность загрязнения здесь существенно повысилась по сравнению с 1975 г., когда не было дамбы, а расход вод через эту часть губы существенно возрос. По данным спутниковых съемок Ладожского озера нами были выявлены особенности разнообразных вихревых образований, грибовидных структур, фронтальных зон, апвеллингов. Эти результаты были опубликованы в Докладах АН [12].

В те годы, когда Кондратьев работа в ИНОЗ, нам, сотрудники ИНОЗ принимали участие в симпозиумах и семинарах, инициатором и организатором которых был он. Мы участвовали в работе форумов в Москве, на которых присутствовали разработчики космической техники, аппаратуры для дистанционного зондирования, ученые, которые занимались дешифрированием информации, и космонавты – специалисты, с которыми мы озероведы имели возможности работать. В Ленинграде академик организовал постоянно действующие семинары по самым актуальным проблемам окружающей среды, лимнологии, климата, применению дистанционных методов. При Ленинградском научном центре Кирилл Яковлевич создал постоянный научный семинар и ученый совет по защите кандидатских и докторских диссертаций, в котором также проходили защиты диссертаций в области лимнологии.

В конце 1980-х годов по его инициативе и благодаря его авторитету мы были вовлечены в международный эксперимент по созданию информационной системы об озерах мира, который проводился под эгидой Международного центра великих озер ILEC [13]. В рамках деятельности ILEC по инициативе Кирилла Яковлевича были организованы международные совещания в Ленинграде, Петрозаводске, Иркутске.

В тяжелые 1990-е годы финансирование в Академии наук стало нерегулярным, почти не было средств на приборы, экспедиции, да и зарплату зачастую задерживали. В то время некоторые ученые стремились уехать на запад, особенно беспокоила судьба молодых ученых. К.Я. Кондратьев не был простым созерцателем, он думал как изменить ситуацию, когда ослабла государственная поддержка науки, как сохранить перспективные направления, к развитию которых он был причастен. И в начале 1990-х годов на симпозиуме в Китае у них, вместе с профессором Олой Йохансенном из Норвегии, родилась идея создать научный центр по окружающей среде и дистанционным методом имени Фритьофа Нансена в России. Главной задачей этого центра должно быть: решение актуальных проблем окружающей среды и климата Арктики и Субарктики, внедрение новых современных технологий в изучение окружающей среды, таких как дистанционные аэрокосмические и геоинформационные системы, моделирования. И эту идею они блестяще воплотили в Санкт-Петербурге. «Приютил» их на время Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН (директор – профессор В.К. Донченко), где с 1992 г. работал Кирилл Яковлевич. Директором этого международного центра стал ученик академика Кондратьева – Л.П. Бобылев. Во время работы в Нансен-Центре по его инициативе была подготовленная коллективная монография *Limnology and Remote sensing* [14], в которой авторами – сотрудниками ИНОЗ РАН, Нансен-Центра, ИВПС КарНЦ РАН, Нансен-Центра из Бергена были обобщены сведения в области дистанционных методов в лимнологии.

Интересы Кирилла Яковлевича в Институте озероведения не ограничивались только лимнологией. В начале 1980-х годов – в годы холодной войны – в мире активно обсуждались вопросы возможных последствий ядерной войны. В работах же Кирилла Яковлевича было показано: в результат

будет «ядерный хаос». Во время работы в ИНОЗ, он издал книги, посвященные атмосфере Венеры и Марса. Кроме вышеуказанных проблем, в годы работы в ИНОЗ (1982–1992 гг.) Кирилл Яковлевич не прекращал также заниматься физикой атмосферы, уже тогда он активно работал над проблемами изучения парниковых газов, глобальными изменениями климата – теми вопросами, которые остро обсуждаются в настоящее время в XXI веке. Разрабатывал он совершенно новые научные направления, например, в 1983 г. была опубликована его новая книга «Спутниковая климатология».

В 1991 г. при содействии К.Я. Кондратьева, поддержке ООФАГ АН СССР на базе Отдела водных проблем Карельского филиала АН СССР был создан новый Институт водных проблем Севера, и Кирилл Яковлевич в первые годы его становления был членом ученого совета нашего института. Он активно поддерживал исследования ИВПС в области лимнологии.

Роль академика Кондратьева как научного лидера была чрезвычайно велика не только в Институте озероведения, но и в НИЦЭБ РАН, Нансен-Центре. С ним было интересно работать, заниматься наукой. С Кириллом Яковлевичем обсуждали новые книги, идеи по разным проблемам: климата, лимнологии, океанологии, устройству России, устойчивого развития, глобализации, по медицинским проблемам выживания человечества. Мы видели насколько огромен диапазон его интересов, знаний, Теперь становиться понятным его интерес к проблемам медицины, отмечаем его прозорливость в связи с современной тяжелой ситуацией с эпидемией, который распространяется по всей планете и к борьбе, с которым оказалось не готово человечество.

Кирилл Яковлевич был из тех, кто определял будущий путь развития научных направлений, деятельность институтов, лабораторий, ученых.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 19-15-00022\19, предоставленному для издания монографии «Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / под ред. Н.Н. Филатова. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2020. 255 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хендерсон-Селлерс Б., Х.Ф. Маркленд. Умирающие озера: Причины и контроль антропогенного эвтрофирования / Перевод с англ. под ред. К. Я. Кондратьева, Н. Н. Филатова. Л. Гидрометеоздат, 1990. 278 с.
2. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л., Гидрометеоздат, 1987. – 336 с.
3. Кондратьев К.Я., Д.В. Поздняков. Качество природных вод и определяющие его компоненты. Л.: Наука, 1984. 54 с.
4. Кондратьев К.Я., В.В. Мелентьев, В.А. Назаркин. Космическая дистанционная индикация акваторий и водосборов. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 248 с.
5. Robert P. Bukata, John H. Jerome, Kirill Ya. Kondratyev and Dimitry V. Pozdnyakov. Satellite Monitoring Of Optically-Active Components Of Inland Waters: An Essential Input To Regional Climate Change Impact Studies. J. Great Lakes Res. 17(4):470–478.
6. Robert P. Bukata, John H. Jerome, Kirill Ya. Kondratyev and Dimitry V. Pozdnyakov Estimation of organic and inorganic matter in inland waters: Optical cross sections of Lakes Ontario and Ladoga. J. Great Lakes Res. 17(4):461–469.
7. Комплексный дистанционный мониторинг озер. Под. ред. К.Я. Кондратьева. Л.Наука. 1987. 288 с.
8. Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 166 с.
9. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. и др. Большое озеро как имитационная модель океана. Л.:Наука, 1985. 62 с.
10. Kondratyev R.J., Pozdnjakov D.V. et al. Lake as an ocean simulation model and test area to improve techniques for remote sensing of the ocean. Remote sensing in ocean&atmosph. Proc.Sympos.Canberra. Australia, 1989. p. 134.
11. Кондратьев К.Я., Филатов Н.Н., Зайцев Л.В. Оценка водообмена и зон загрязнения по данным космической съемки. Доклады АН СССР, т. 304, № 4, 1989, с. 829–833.
12. Кондратьев К.Я., Филатов Н.Н., Зайцев Л.В. Зубенко А.В. Особенности динамики вод Ладожского озера по данным дистанционного зондирования. Доклады АН СССР, т. 293, № 5, 1987. С. 1224–1227.
13. Data book of world lake environments: a survey of state of world lakes. [S. I.], 1987–1993. 160 p.
14. Kondratyev K., Filatov N.N., Pozdnjakov D.V., O.Johhannesen et.all. Limnology and remote sensing. A contemporary approach. Eds. By K.Kondratyev, N. Filatov. Springer-Praxis. London. 1999. 412 p.

Шаров А.Н.

Фитопланктон северных озер в условиях климатической изменчивости

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии внутренних вод
им. И.Д. Папанина РАН,
Россия, 152742, Ярославская обл., пос. Борок Некоузского района
E-mail: sharov@ibiw.ru

В работе анализируются результаты исследования 1993–2019 гг. фитопланктона озер Севера Европейской территории России и Восточной Антарктиды при изменениях метеорологических условий (климата) и степени антропогенного воздействия. Видовое богатство планктонных водорослей в холодноводных водоемах в основном определяется размерами и характером водосбора. В исследованных озерах Севера ЕТР и Антарктиды обнаружен 781 таксон фитопланктона рангом ниже рода. Биомасса фитопланктона в период исследования варьировала в широких пределах – от нескольких мгк/л в антарктических озерах до 34 мг/л в оз. Псковском. При эвтрофировании даже в субарктическом озере она могла достигать 20 мг/л в районах поступления хозяйственно-бытовых сточных вод. Низкие количественные показатели и видовое разнообразие являются характерной чертой фитопланктона антарктических озер. Фитопланктон крайне беден в связи с низкими температурами воды и содержанием биогенных веществ.

Климатическая изменчивость, в том числе и в зимний период, влияет на развитие планктонных водорослей. В водоемах Севера России изменения климата сказываются в первую очередь на ледовом режиме. Это может влиять на продолжительность вегетационного периода и на сезонные циклы водных организмов. Изменение климата отразилось на увеличении сезонной и межгодовой динамике биомассы фитопланктона. Структура биомассы фитопланктона изменяется в сторону преобладания цианобактерий, зеленых и криптофитовых водорослей.

Ключевые слова: планктон, индекс NAO, биомасса, видовой состав, цианобактерии.

Andrey N. Sharov

Phytoplankton of a northern lakes under climatic variability

Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences,
Borok Settl, Yaroslavl region, 152742, Russia,
E-mail: sharov_an@mail.ru

This article examines results of a study phytoplankton of lakes in the North of the European Russia and East Antarctica under climate changes in 1993–2019. The species planktonic algae in the cold lakes is mainly determined by the size and nature of the catchment. 781 phytoplankton taxa of a rank lower than the genus were found in the studied lakes of the Russian North and Antarctica. The biomass of phytoplankton during the study period varied widely – from several mkg/l in Antarctic lakes to 34 mg/l in lake. Pskov. With eutrophication, even in a subarctic lake, it could reach 20 mg/l in the areas of domestic wastewater. Low quantitative indicators and species diversity are a characteristic feature of the phytoplankton of Antarctic lakes. Phytoplankton is extremely poor due to low water temperatures and nutrient content.

Climatic variability, including in winter, affects the development of planktonic algae. In the waters of the North of Russia, climate change primarily affects the ice regime. This may affect the length of the growing season and the seasonal cycles of aquatic organisms. Climate change has affected the increase in seasonal and interannual dynamics of phytoplankton biomass. The structure of phytoplankton biomass changes in the direction of the prevalence of cyanobacteria, green and cryptophytic algae.

Keywords: plankton, NAO index, biomass, species composition, cyanobacteria.

Введение

Современные тенденции изменения климата проявляются в изменении погодных характеристик и в увеличении частоты и интенсивности экстремальных климатических событий (климатическая

изменчивость). Глобальные современные климатические флуктуации и локальное антропогенное воздействие приводят к перестройке структуры и функционирования водных экосистем [1]. Особенно чувствительными к влиянию климатических и антропогенных факторов являются пресноводные экосистемы полярных регионов [2]. Типичные для полярных широт (Арктика и Антарктида) – холодноводные озера со средней температурой воды в летний период $<15\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые, как правило, относятся к олиготрофному типу и характеризуются высоким качеством воды.

К настоящему времени выполнены многочисленные исследования, благодаря которым стали ясны закономерности антропогенных преобразований окружающей среды и отклика на антропогенный стресс. Однако совместному изучению трансформации фитопланктона под влиянием изменения климата и комплекса антропогенных прямых и опосредованных воздействий на водные экосистемы, расположенные в высоких широтах, уделяется недостаточно внимания.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись сообщества фитопланктона водоемов Европейского Севера России и озера Восточной Антарктиды в различных климатических условиях и под влиянием разнотипного антропогенного воздействия. Материалом работы послужили более 1.5 тыс. проб фитопланктона, собранных в период с 1993 по 2019 г. на крупных и малых водоемах, подвергающихся воздействию сточных вод и влиянию аэротехногенного загрязнения: малые озера арктической зоны (Мурманская обл), Субарктики (сев. Карелия), бореальной зоны (Карелия) и Восточной Антарктиды; крупные озера - Онежское, Чудско-Псковское. Пробы фитопланктона отбирали батометром Рутнера, фиксацию и камеральную обработку проб осуществляли с использованием стандартных методов. Определение видового состава и подсчет водорослей проводили в осадочных камерах объемом 2 и 0.02 мл с использованием инвертированного светового микроскопа “Zeiss”, Ломо МБИ-6 при увеличении 360x, 720x, 1134x. Значения индекса североатлантического колебания (САК) были взяты с интернет сайта <http://climatedataguide.ucar.edu>.

Результаты

В период исследований (1993–2019 гг.) в фитопланктоне различных озер на Севере ЕТР и Восточной Антарктиды выявлен 781 вид, разновидность и форма водорослей, из них: Bacillariophyta – 368, Chlorophyta – 175, Cyanobacteria – 127, Chrysophyta – 62, Dinophyta – 19, Euglenophyta – 16, Cryptophyta – 14. Проведенное сравнение видового состава доминирующих комплексов фитопланктонных сообществ в различных холодноводных озерах показывает, что видовое богатство водорослей в основном определяется размерами и характеристиками водосбора [3]. Общее число таксонов в видовом составе фитопланктона в исследованных озерах колебалось от 13 в малых озерах Антарктиды до 714 в Онежском озере и, как правило, нарастало по мере увеличения площади водосбора и количества поступающих биогенных веществ.

В фитопланктоне холодноводных больших озер преобладают диатомовые водоросли. В небольших озерах роль диатомовых снижается, и доминантами чаще выступают золотистые, криптофитовые и зеленые, иногда динофитовые и цианобактерии [4]. Вспышки развития цианобактерий в районах исследований в 1993–2006 гг. не зарегистрированы (биомасса $<0.1\text{ мг/л}$). Хотя в отдельных мелководных заливах биомасса цианобактерий достигала 0.5 мг/л .

Увеличение климатической изменчивости (потепление климата) в регионе исследования многократно усиливает эвтрофирование вод и вызывает массовое развитие водорослей фитопланктона и цианобактерий в летний период даже в северных водоемах [5, 6], что ранее в 1990-х гг. не наблюдалось [4].

На примере оз. Онежского были изучены характеристики фитопланктона за 20-летний период в связи с факторами климатической изменчивости [7]. Корреляционный анализ обнаружил значимые ($p < 0.05$) положительные связи между содержанием хлорофилла «а» и температурой воды ($R = 0.66$; $p = 0.03$) и отрицательные между содержанием хлорофилла «а» и продолжительностью безледного периода ($R = -0.53$; $p = 0.05$).

Выявлено, что общая численность фитопланктона зависит от продолжительности периода без льда ($R = -0.89$; $p = 0.006$). Наибольшей численность была для тех лет, когда был самым длительным период ледового покрова озера [7]. В то же время не обнаружены достоверные корреляционные связи между климатическими переменными и общей биомассой фитопланктона Онежского и Чудско-Псковского озера из-за сильных сезонных колебаний и возможного влияния других факторов [7, 8].

В оз. Чудско-Псковском выявлено, что биомасса диатомовых водорослей в августе отрицательно коррелирует с температурой воды ($R = -0.80$; $p = 0.01$). Среднегодовое содержание азота коррелировало с уровнем воды в озере ($R = 0.74$; $p = 0.02$). Уровень воды в Чудском озере связан ($R = 0.54$; $p = 0.003$) со среднемесячным индексом североатлантического колебания (САК) в августе [9]. Очевидно, что в маловодные годы с водосбора поступает меньше биогенных веществ в озеро, чем в многоводные годы, снижая степень развития фитопланктона.

Численность планктонных цианобактерий оз. Чудско-Псковского значительно возростала ($R = 0.89$; $p = 0.006$) в годы с высоким индексом САК. Обнаружены тесные положительные связи ($R = 0.83$; $p = 0.02$) между концентрацией Р в воде в августе и летним индексом САК, а отрицательные с САК в марте ($R = -0.82$; $p = 0.001$) [8].

Содержание хлорофилла «а» ($R = -0.78$; $p = 0.01$) и интенсивность первичного продуцирования фитопланктона находится в обратной зависимости от количества осадков в августе [7], которое в свою очередь связано с продолжительностью солнечного сияния ($R = -0.77$; $p = 0.01$).

Множественный регрессионный анализ подтверждает тесную связь между САК и региональными климатическими переменными (температура воды, осадки, безледный период) при $p < 0.01$, а также между индексом арктической осцилляции (АО) и этими климатическими переменными при $p < 0.02$. Кроме того, этот анализ (при $p < 0.05$) показывает, что концентрация хлорофилла «а» в воде определяется в основном глобальными показателями, зависящими от температуры воды, и связана с продолжительностью безледного периода [8].

Освобождение ото льда озер Антарктиды не приводит к прогреву воды, как это характерно для озер Восточной Фенноскандии, так как после схода льда происходит быстрое остывание водной массы от поверхности до дна в результате радиационного выхолаживания и ветро-волнового перемешивания [10, 11]. При этом устанавливается изотермия с температурой 0.5°C , что как минимум на 3°C ниже по сравнению с озерами, покрытыми льдом. При перемешивании воды происходит отрыв донных водорослей от субстрата и переходу их в планктонное состояние. При этом низкие значения биомассы и видового разнообразия подледного фитопланктона увеличиваются в десятки раз.

Заключение

Климатические изменения могут привести к трансформации структурных и количественных характеристик водных сообществ. В водоемах Севера России изменения климата сказываются в первую очередь на ледовом режиме. Это может влиять на продолжительность вегетационного периода и на сезонные циклы водных организмов. В то же время достоверных корреляционных связей между климатическими характеристиками (температура, осадки, безледный период, САК и др.) и биомассой фитопланктона не обнаружено. Изменение климата отразилось на увеличении сезонной и межгодовой динамике биомассы фитопланктона, численности цианобактерий.

Возможное потепление климата в северных регионах замедлит процессы восстановления озер, поскольку усилятся приток и круговорот биогенных элементов, преимущественное развитие получат более теплолюбивые виды, характерные для эвтрофных вод, а типичные арктические виды не восстановят свою численность.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ: 10-05-00963 и 19-04-01000.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филатов Н.Н., Меншуткин В.В. Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных водоемов под влиянием климата и антропогенных факторов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. № 48. С. 120–147.
2. Anisimov O.A., D.G. Vaughan T.V. Callaghan C. Furgal H. Marchant T.D. Prowse H. Vilhjálmsson and J.E. Walsh, Polar regions (Arctic and Antarctic). Climate Change // Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge. 2007. P. 653–685.
3. Шаров А.Н. Оценка качества вод разнотипных холодноводных озер по показателям фитопланктона // Региональная экология. 2017. № 2(48). С. 40–47.
4. Шаров А.Н. Фитопланктон водоемов Кольского полуострова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2004. 113 с.

5. Денисов Д.Б., Кашулин Н.А. Цианопрокариоты в составе планктона оз. Имандра (Кольский полуостров) // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Апатиты, 2016. Вып. 4. № 7 (41). С. 40–56.
6. Шаров А.Н., Никулина В.Н., Максимов А.А. Фитопланктон небольшого арктического озера в условиях климатической изменчивости // Региональная экология. 2019. № 2 (56) С. 51–56.
7. Sharov A.N., Berezina N.A., Nazarova L.E., Poliakova T.N., Chekryzheva T.A. Links between biota and climate-related variables in the Baltic Region using Lake Onega as an example // *Oceanologia*. 2014. Vol. 56. № 2. P. 291–306.
8. Sharov A., Andreeva I. Phytoplankton responses to climate change in the large lakes of the Baltic Sea basin // *Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis*. 2015. 15 (2). P. 349–358.
9. Шаров А.Н., Андреева И.В. Пространственно-временная организация фитопланктона Чудско-Псковского озера // Принципы экологии. 2016. Т. 5. № 5. С. 71–80.
10. Филатов Н.Н., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Назарова Л.Е., Пальшин Н.И., Руховец Л.А., Толстиков А.В., Шаров А.Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер // Вестник РФФИ. 2013. №2 (78). С. 43–50.
11. Шаров А.Н., Толстиков А.В. Экологические проблемы озер Восточной Антарктиды // Региональная экология. 2018. № 3(53). С. 5–14.

Шалина Е.В.^{1,2*}, Бобылев Л.П.¹

Изменение ледяного покрова Арктики за последние десятилетия

¹ Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена
Россия, 199034, Санкт-Петербург, 14-я Линия В.О., д. 7

*E-mail: elena.shalina@niersc.spb.ru

² Институт наук о Земле, СПбГУ
199034, Университетская наб., д. 7–9

В статье приведены данные о трансформациях ледяного покрова Арктики за период спутниковых наблюдений с 1979 по 2019 год. Длинный временной ряд пассивных микроволновых измерений позволяет оценить изменение площади как ледяного покрова в целом, так и соотношения площадей однолетних и многолетних льдов. В статье показано, что сокращение площади ледяного покрова происходит со средней скоростью 4,7% за десятилетие, при этом площадь льдов зимой уменьшается со скоростью 2,5% за десятилетие, а тренд сокращения площади льдов, переживших летнее таяние, составляет 14% за декаду. Данные космического мониторинга показывают, что за время спутниковых наблюдений произошло изменение соотношения старых и молодых льдов: в настоящее время однолетние льды преобладают в ледяном покрытии Арктики на момент его максимального развития, а площадь льдов старше 4-х лет уменьшилась с 30% в середине 80-х годов до 2,5% в 2016 году. Лёд Арктики стал в среднем более тонким, что привело к существенному увеличению скорости дрейфа льдов после 2000 года.

Ключевые слова: ледяное покрытие Арктики, изменение климата.

Shalina E.V.^{1,2*}, Bobylev L.P.¹

Arctic sea ice transformations over the last decades

¹ Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre
St. Petersburg, 199034, 14-th Line, 7

*E-mail: elena.shalina@niersc.spb.ru

² St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences
St. Petersburg, 199034, University emb. 7-9

Satellite observations help to reveal critical polar sea ice changes. Passive microwave measurements have been used to evaluate sea ice area decline, and sea ice age changes that show significant shift in the Arctic sea ice cover, from a pack with high concentration of old ice to a sea ice cover dominated by first-year ice. Satellite data show that over the past 41 years Arctic sea ice area has been declining by 4.7 percent per decade on the average, by 2.5 percent per decade in March, when the sea ice reaches its maximum extent, and by 14 percent per decade in September, the month that marks the end of the summer melt season. The proportion of sea ice of four years or older has declined from more than 30 percent of the March ice in the 1980s to 2.5 percent by 2016. Less old multiyear ice and increased area of first-year ice implies that the ice cover is thinning, which makes it more vulnerable to further melting and caused intensification of sea ice drift after 2000.

Keywords: Arctic sea ice, climate change.

Введение

Вследствие присущего климатической системе Земли явления «арктического усиления» [1, 2, 3, 4, 5], наблюдаемое в настоящее время глобальное потепление наиболее сильно выражено в Арктике. Сокращение площади ледяного покрова Северного Ледовитого океана является наиболее явным проявлением современного потепления, являясь в то же время одной из главных движущих сил арктического усиления [6] за счёт положительной обратной связи между уменьшением альбедо морской поверхности при сокращении площади, покрытой льдом, и увеличением поглощения солнечной радиации. Другой процесс, вносящий вклад в арктическое усиление и связанный с параметрами ледяного покрова, - это ослабление теплоизоляционной способности льда в осенне-зимний период. Лёд в среднем становится тоньше, а потому слабее изолирует более тёплые воды океана от холодной атмосферы, способствуя повышению температуры воздуха и далее увеличению концентрации водяного пара и облачности, что, в

свою очередь, ведёт к увеличению приходящего на поверхность длинноволнового излучения и способствует замедлению нарастания толщины льда. Наличие и надёжность данных о происходящих изменениях в ледяном покрове Арктики имеют принципиальное значение для совершенствования модельных расчётов и, в частности, для повышения точности прогнозов относительно изменений климата Арктики и глобального климата в будущем.

Основой мониторинга ледяного покрова в Арктике в последние десятилетия являются спутниковые наблюдения, которые обеспечивают как оперативное получение объективных сведений о состоянии морского льда и наличии опасных ледяных образований в любом регионе Арктики, так и накопление информации о глобальных изменениях ледовых условий, позволяющее как оценивать произошедшие трансформации, так и строить прогнозы относительно изменений будущих. Возможности и ограничения методов дистанционного зондирования при мониторинге ледяного покрова зависят от способа зондирования (активное или пассивное), используемого диапазона электромагнитного спектра, а также от параметров съёмки и свойств аппаратуры. К настоящему времени накоплен огромный массив данных, описывающих изменения ледяного покрова Арктики. Базируясь на спутниковых наблюдениях, определяют протяжённость ледяного покрова, сплочённость, толщину льдов, их возраст, дрейф, а также типы льдов. Некоторые из накопленных рядов имеют достаточную протяжённость, чтобы делать заключения о климатических изменениях, в частности, это относится к данным о протяжённости (площади) ледяного покрова и к сведениям об изменениях в соотношении типов льдов.

Кроме научной значимости, сведения о состоянии ледяного покрова, а также возможность описания тенденций изменения его параметров, имеют очевидное значение для мореходства в Северных морях, для планирования и осуществления добычи полезных ископаемых на шельфе, а также для формирования адекватной позиции при разработке программ развития северных территорий Российской Федерации. В частности, изменение ледовых условий в Арктике напрямую связано с уровнем использования Северного морского пути, имеющего большое значение для обеспечения дальнейшего развития как экономики арктических регионов, так и государства в целом.

Сокращение протяжённости ледяного покрова

Наиболее продолжительный ряд данных о состоянии арктического ледяного покрова существует и пополняется благодаря измерениям в микроволновом диапазоне по программе Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), финансируемой Министерством обороны США, наблюдения в рамках которой начались в октябре 1978 года и продолжаются по сей день. Данные о ледяном покрове, полученные на базе этих измерений, распространяются целым рядом ресурсов, в частности, nsidc.org, arctic-roos.org, osi-saf.org и другими. Это данные о протяженности и площади ледяного покрова, сплоченности льда, возрасте льда, соотношении однолетнего и многолетнего типов льдов, дрейфе льдов и другие. Точность определения сплоченности по спутниковым данным (а именно этот параметр является базовым для расчетов многих других характеристик ледяного покрова) обычно оценивают диапазоном $\pm 5\%$ зимой и $\pm 15\%$ летом [7].

Сокращение площади ледяного покрова Арктики обсуждается научным сообществом с конца прошлого столетия [8, 9]. В текущем столетии исследователи констатировали всё убыстряющееся сокращение площади льдов северного полушария [10, 11, 12, 13, 14, 15]: от 3% за декаду в начале столетия до 4,5% к концу 2017 г. Сокращение площади ледяного покрова Арктики за период пассивных спутниковых наблюдений в микроволновом диапазоне по данным до декабря 2019 г. показано на рисунке 1. Площади рассчитаны с помощью алгоритма NORSEX (arctic-roos.org) и представлены в виде отклонений от средних месячных значений. Данные демонстрируют отрицательный тренд: площадь льдов сокращается со средней скоростью 4,7% за декаду.

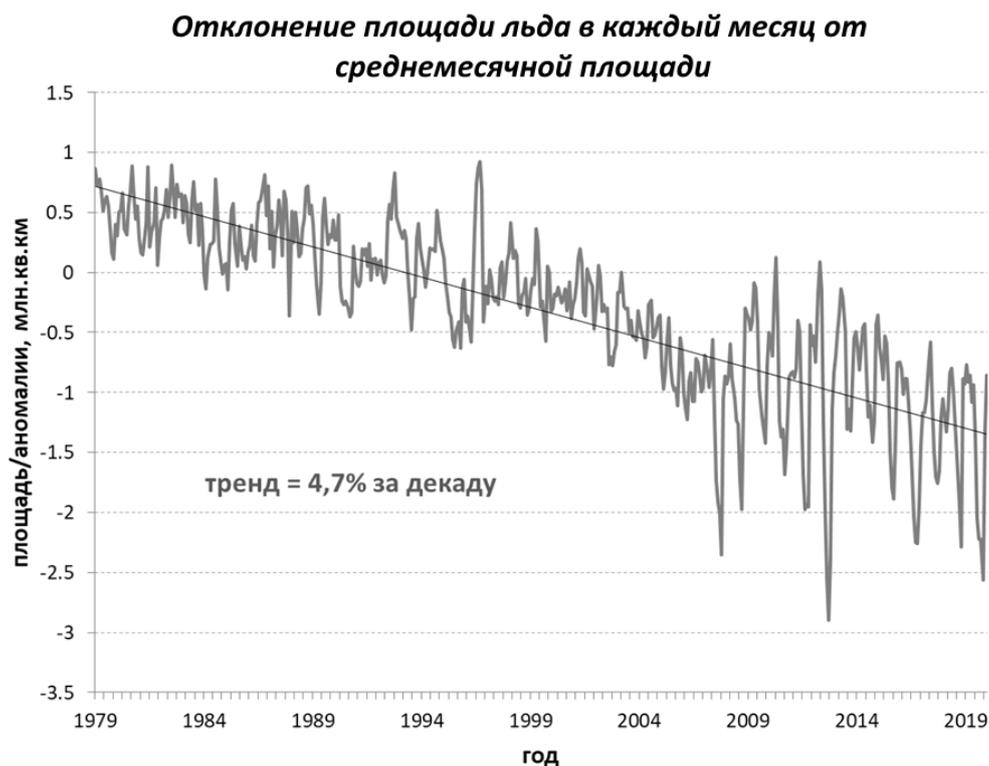


Рис. 1. Изменение площади ледяного покрова в Арктике. Показаны отклонения от среднемесячных значений (аномалии) и линия линейного тренда, рассчитанная с применением метода наименьших квадратов

Наибольшие изменения демонстрирует ледяной покров Арктики в летние месяцы. Если ледяной покров, наблюдаемый в марте (а это месяц, когда ледяной покров нарастает до максимальных площадей) сокращался в среднем на $2,5 \pm 0,3\%$ в десятилетие за период с 1979 года по настоящее время, то площадь сентябрьских льдов (это площадь льдов, переживших летнее таяние) сокращалась со скоростью $14 \pm 1\%$ за декаду. Указанные проценты изменений рассчитаны по отношению к средним площадям в рассмотренные месяцы за весь период наблюдений, с 1979 по 2019 гг. В абсолютных значениях средняя скорость сокращения составляет $37470 \pm 3500 \text{ км}^2$ в год в марте и $76050 \pm 6220 \text{ км}^2$ в год в сентябре (рисунок 2). Период, когда площадь сентябрьского льда сокращалась наиболее интенсивно, наблюдался с 1996 по 2012 год. Средняя скорость уменьшения площади ледяного покрова в это время была более чем в два раза выше, чем в среднем за весь период наблюдений, и составляла $162470 \pm 20700 \text{ км}^2$ в год.

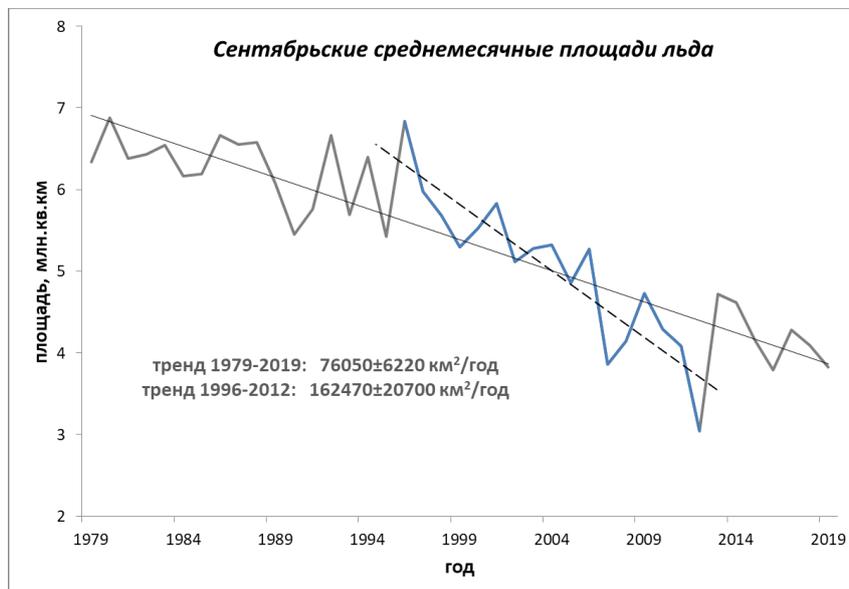


Рис. 2. Изменение площади сентябрьского ледяного покрова в Арктике

Изменения, происходящие с ледяным покровом в полярных областях, негативно влияют на многие процессы, происходящие в экосистеме Арктики. Так, белые медведи и моржи охотятся, разводят потомство и мигрируют, используя ледяной покров, и его сокращение существенно осложняет условия их существования, приводя к снижению показателей рождаемости, уменьшению возможностей добывать пропитание и другим отрицательным последствиям.

Изменение возрастного распределения арктических льдов

Важные сведения об изменениях, произошедших в свойствах ледяного покрова Арктики, содержатся в данных о возрасте льда. Мониторинг возраста льда и описание изменений в соотношении классов льдов, определяемых возрастом, можно проводить, используя расчёты по модели, отслеживающей появление льда, его движение и исчезновение [16] на основе спутниковых измерений [17]. В вычислениях используются данные микроволновых спутниковых радиометров, упомянутые выше, а также измерения прибора AVHRR и данные буёв, дрейфующих в Арктике. С помощью описанных данных определяется появление и распространение льда в Арктике, строятся карты дрейфа льда. Расчёты по указанной модели позволили получить временной ряд недельных карт возраста льда, начиная с 1984 года [17, 18], доступный по ссылке <https://nsidc.org/data/nsidc-0611/versions/4>. Полученные данные показывают, что к 2012 году существенно сократилось количество старых льдов. Если в начале ряда наблюдений площадь льдов старше 4-х лет была около $3 \cdot 10^6$ км², и они занимали более 30% всей площади ледяного покрова зимой, то в 2012 году их площадь оценивалась примерно в $0,3 \cdot 10^6$ км² (это около 2,5% всей площади ледяного покрова) и осталась примерно на этом уровне до настоящего времени. В 80-е годы прошлого столетия однолетние льды в зимний период занимали около 35% всей площади ледяного покрова. Теперь же однолетние льды являются преобладающим типом льда в Арктике зимой, занимая до 70% площади океана, покрытой льдом. Карты, иллюстрирующие изменение соотношения разных типов льдов в Арктике в последние десятилетия, приведены на рисунке 3. Изображения показывают распределение льдов по возрастным градациям (однолетний, двухлетний, трёхлетний, четырёхлетний и лёд старше 4-х лет) в сентябре 1984, 2000 и 2018 гг. (по окончании таяния в Арктике) и в марте 1985, 2001 и 2019 гг. (на время максимального распространения ледяного покрова в последующий зимний сезон), наглядно демонстрируя, что однолетний лёд стал доминирующим типом льда в настоящее время, а площадь старых льдов значительно уменьшилась.

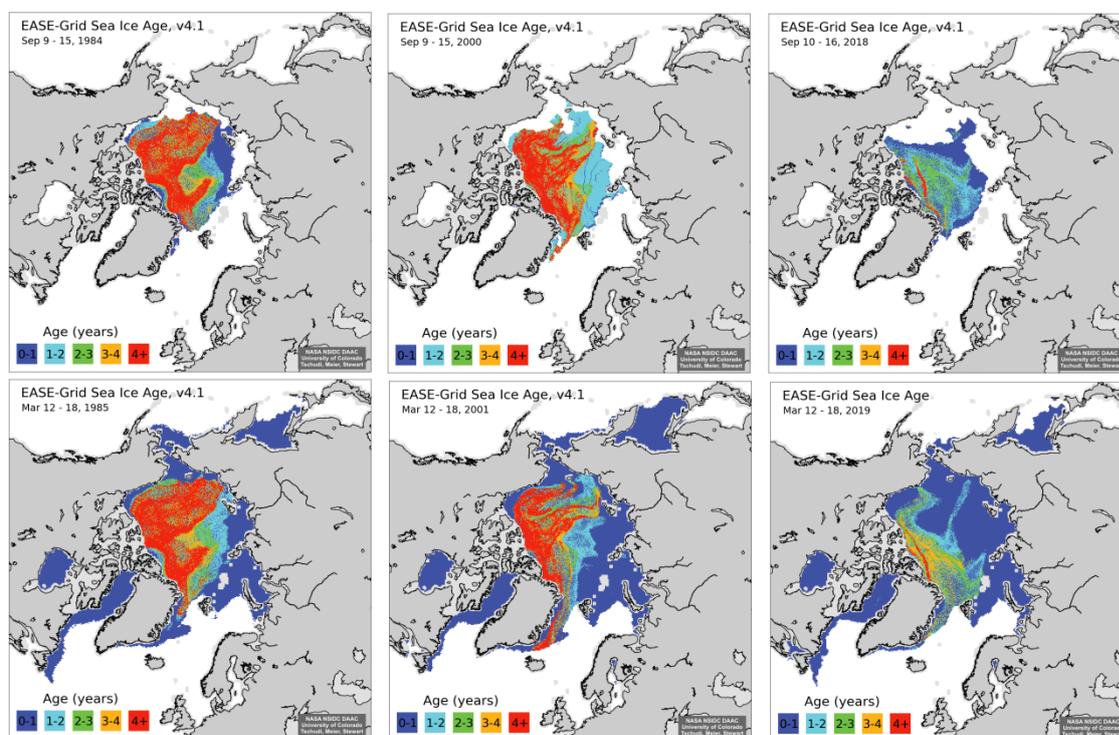


Рис. 3. Возрастные градации льда в Арктике в сентябре (верхний ряд) и марте (нижний ряд) в следующие сезоны нарастания льда: 1984–1985, 2000–2001, 2018–2019

Однолетний лёд показан синим цветом, самый старый лёд (старше 4-х лет) – красным.

<https://nsidc.org/data/nsidc-0611/versions/4>

Разделение ледяного покрова по возрастным градациям можно проводить с использованием разных спутниковых данных и с помощью разных подходов к их обработке. Способы получения данных о возрасте льда, отличные от описанного выше (правда, позволяющие лишь разделить лёд на две градации: однолетний и многолетний) – это 1) обработка микроволновых спутниковых данных пассивного дистанционного зондирования с помощью алгоритмов, использующих различия в излучательной способности однолетних и многолетних льдов [19, 8, 20, 21, 22], 2) обработка данных скаттерометров, основанных на разнице отражённого сигнала ото льдов разных возрастных категорий [23, 24, 25], а также 3) совместная обработка упомянутых данных, когда проблемы, возникающие при обработке одних данных, пытаются решить, подключая другие данные [26, 27, 28, 29]. Результаты получают для зимнего сезона, вне сезона таяния. Указанные подходы к решению задачи выделения многолетнего льда дают разные результаты по площади многолетних льдов, однако, при описании его изменений за период спутниковых наблюдений все сходятся на том, что площадь многолетних льдов существенно сократилась. Так, в статье [24] содержится заключение, что площадь многолетних льдов (полученная по данным скаттерометров) сократилась за период с 1999 по 2017 год более чем на $2 \cdot 10^6$ км², что в процентном соотношении означает сокращение более чем на 50%.

Таким образом, за период спутниковых наблюдений в Арктике стало меньше самого старого и самого толстого арктического льда, что делает ледовое покрытие менее устойчивым к воздействию внешних факторов и более подверженным таянию, а также разрушению и выносу за счёт дрейфа. Сокращение многолетнего льда и всё усиливающееся преобладание относительно тонких однолетних льдов является одним из самых значительных изменений, произошедших в Арктике за последние десятилетия. Кроме прочего, это означает уменьшение объёма льда в Арктике [24, 30].

Уменьшение толщины арктических льдов

Кроме протяженности ледяного покрова Арктики, важным параметром, определяющим баланс ледовой массы, является их толщина. Глобальные наблюдения за толщиной льдов в Арктике стали возможны с запуска спутников, нацеленных на измерения толщины ледяного покрова, что произошло в 2003 году, когда был запущен спутник ICESat. До того данные о толщине льдов получали при измерениях сонарами, установленными на подводных лодках или закреплёнными на дне океана, с помощью электромагнитных измерений с самолётов, а также во время различных арктических экспедиций, путем бурения.

Спутниковый данные, накопленные к настоящему моменту, включают данные измерений на спутнике ICESat, проводившем измерения с 2003 г. по 2008 г., где работал лазерный альтиметр, и на спутнике CryoSat-2, который был запущен в апреле 2010 г., продолжает измерения по сей день, и где работает радар-альтиметр. К сожалению, эти приборы не имели пересекающегося периода функционирования, что облегчило бы совместное использование результатов их измерений. Для оценки изменений толщины арктических льдов за более длительный промежуток времени, данные спутниковых измерений сравнивают с измерениями, полученными американскими и английскими подводными лодками за период с 1958 по 2000 год [24].

Анализ всех доступных наблюдений толщины льда показывает, что наибольшие изменения произошли до начала работы радара-альтиметра на спутнике CryoSat-2. К этому времени существенно изменилось распределение льдов по возрастам, в Арктике стал преобладать однолетний лёд. Лёды, покрывающие Северный Ледовитый океан, стали тоньше на 1,5-2 метра, если рассматривать период с начала наблюдений на подводных лодках до начала поступления данных со спутника CryoSat-2. За короткий период наблюдений спутника ICESat средняя толщина ледяного покрова уменьшилась приблизительно на 0,5 м [24]. Наблюдения CryoSat-2 не демонстрируют значимого тренда, толщина льдов за период работы радара-альтиметра оставалась в среднем на уровне полутора метров, увеличиваясь от чуть более 1 м в начале зимы до 2 м в конце сезона нарастания льда [31].

Заключение

Наши знания об изменениях, произошедших с ледяным покровом Арктики в последние десятилетия, базируются в основном на данных дистанционного зондирования. Спутниковые наблюдения показывают, что площадь ледяного покрова Арктики сокращается со средней скоростью 4,7% за

десятилетие, при этом основной вклад в это сокращение вносит уменьшение площади льдов, переживших летнее таяние, которое происходит со скоростью около 14% за десятилетие. Важная трансформация произошла в распределении возрастных градаций арктических льдов: если в начале периода спутниковых наблюдений старые льды возрастом более 4-х лет занимали более 30% всего ледяного покрова, то теперь их не более 2,5%. Однолетний лёд стал преобладающим типом льда в Арктике. Однолетние льды тоньше многолетних и потому легче тают, причём таяние весной теперь начинается раньше, а замерзание осенью - позже, чем несколько десятков лет назад. Кроме того, тонкие льды более мобильны и более подвержены разрушению под действием ветров и волн. Спутниковые измерения показывают существенное увеличение скорости дрейфа льдов в Арктике после 2000 года. Спутниковый ряд измерений толщины арктических льдов короток и неоднороден, но, будучи помещён в контекст всех имеющихся на данный момент измерений, дополняет картину, которая показывает сокращение толщины льдов Арктики в течение последних десятилетий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61618X0103.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bekryaev, R. V., Polyakov, I. V., Alexeev, V. A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // *J. Clim.* 2010. Vol.23, PP. 3888–3906.
2. Lu, J., Cai, M., Quantifying contributions to polar warming amplification in an idealized coupled general circulation model // *Clim. Dynam.* 2010. Vol.34, PP. 669–687.
3. Serreze, M.C., Barry, R.G., Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Global and Planetary Change.* 2011. Vol. 77, P. 85–96.
4. Pithan, F., Mauritsen, T., Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // *Nature Geosci.* 2014. Vol.7, PP. 181–184.
5. Johannessen, O.M., Kuzmina S., Bobylev L., Miles M. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalization // *Tellus A.* 2016. Vol.68, P. 28234, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.28234>
6. Dai, A., Luo, D., Song, M. et al. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO // *Nat. Communications.* 2019. Vol.10, 121. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07954-9>
7. Sea Ice Index, Version 3.0. https://nsidc.org/data/g02135?qt-data_set_tabs=2#qt-data_set_tabs
8. Johannessen O.M., Shalina E.V., Miles M.W. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation // *Science.* 1999. Vol. 286. P. 1936–1938.
9. Vinnikov, K., A. Robock, R. J. Stouffer, J.E. Walsh, C.L. Parkinson, D.J. Cavalieri, J. F. B. Mitchell, D. Garrett, and V. F. Zakharov, Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent // *Science.* 1999. Vol. 286, P. 1934-1937.
10. Parkinson, C. L., D. J. Cavalieri, P. Gloersen, H. J. Zwally, and J. C. Comiso. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996 // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol.104(C9), P.20837–20856, doi:10.1029/1999JC900082.
11. Cavalieri, D. J., C. L. Parkinson. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *Cryosphere.* 2012. Vol.6, P. 881–889, doi:10.5194/tc-6-881-2012.
12. Stroeve, J. C., M. C. Serreze, M. M. Holland, J. E. Kay, J. Maslanik, and A. P. Barrett. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // *Climatic Change.* 2012. Vol. 110(3-4), P. 1005–1027, doi:10.1007/s10584-011-0101-1.
13. Serreze, M.C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // *Phil.Trans. R. Soc. A.* 2015. 373. P. 20140159. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0159>.
14. Шалина, Е.В. Изменение ледовитости северных морей России и повышение доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // *Исследование Земли из космоса.* 2015. №4. С. 67–78.
15. Шалина, Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. Т.14. № 6. С. 28-41. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41

16. Fowler, C., Emery W., Maslanik J. A. Satellite derived arctic sea ice evolution Oct. 1978 to March 2003. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Lett. 2004. 1(2), P.71–74.
17. Tschudi, M., C. Fowler, J. Maslanik, J. S. Stewart, W. Meier. EASE-Grid Sea Ice Age, Version 3. Boulder, Colorado USA // NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.5067/PFSVFZA9Y85G>.
18. Tschudi, M., Meier, W. N., and Stewart, J. S.: An enhancement to sea ice motion and age products // The Cryosphere Discuss., in review, 2019. <https://doi.org/10.5194/tc-2019-40>.
19. Grenfell, T. C. Surface-based passive microwave studies of multiyear sea ice // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97(C3), P. 3485–3501, doi:10.1029/91JC02651.
20. Comiso, J. C. A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic // Geophys. Res. Lett., 2002. Vol. 29(20), P. 1956, doi:10.1029/2002GL015650
21. Hao, G., J. Su, A study of multiyear ice concentration retrieval algorithms using AMSR-E data // Acta Oceanol. Sin. 2015. Vol. 34 (9), P. 102–109, doi:10.1007/s13131-015-0656-1.
22. Lee, S.-M., B.-J. Sohn, S.-J. Kim. Differentiating between first-year and multiyear sea ice in the Arctic using microwave-retrieved ice emissivities // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. Vol. 122, P. 5097–5112, doi:10.1002/2016JD026275.
23. Kwok, R. Annual cycles of multiyear sea ice coverage of the Arctic Ocean: 1999–2003 // J. Geophys. Res. 2004. Vol.109, C11004.
24. Kwok, R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018) // Environ. Res. Lett. 2018. Vol. 13, P. 105005, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae3ec>
25. Nghiem, S. V., Rigor I. G., Perovich D. K., Clemente-Colon P., Weatherly J. W., Neumann G. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice // Geophys. ResLett. 2007. Vol.34, L19504, doi:10.1029/2007GL031138.
26. Shalina E.V., Johannessen O.M. Multiyear sea ice concentration mapping using passive and active microwave satellite data // IEEE Xplore, Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad 2008). 2008. doi: 10.1109/MICRAD.2008.4579513.
27. Swan, A.M., Long, D.G. Multiyear arctic sea ice classification using QuikSCAT // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. Vol. 50, P. 3317–3326.
28. Lindell, D.B., Long, D.G. Multiyear Arctic sea ice classification using OSCAT and QuikSCAT // IEEE Trans.Geosci. Remote Sens. 2016. Vol. 54, P.167–175.
29. Breivik, L.-A., S. Eastwood, Upgrade of the OSI SAF sea ice edge and sea ice type products - Introduction of ASCAT. Tech. Rep., Norwegian Meteorological Institute. 2009. OSI-402-c & OSI-403-c. 2017. 43 p.
30. Laxon S. W., K. A. Giles, A. L. Ridout, D. J. Wingham, R. Willatt, R. Cullen, R. Kwok, A. Schweiger, J. Zhang, C. Haas, S. Hendricks, R. Krishfield, N. Kurtz, S. Farrell, M. Davidson. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume // Geophys Res Lett. 2013. Vol. 40, P. 732–737, doi:10.1002/grl.50193.
31. Tilling R., Ridout A., Shepherd A. Estimating Arctic sea ice thickness and volume using CryoSat-2 radar altimeter data // Advances in Space Research. 2017. 62, 1203-1225. DOI: 10.1016/j.asr.2017.10.051.

Оглавление

Секция 1 «Исследование Земли из космоса»	4
Бузников А.А.	
Академик К.Я. Кондратьев – выдающийся ученый и организатор науки	4
Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А.	
Прогноз температуры поверхности городской среды Санкт-Петербурга на основе спутникового картирования теплофизических свойств	14
Груздев В.Н., Шилин Б.В.	
Индикационная роль спектральных характеристик	22
Зеленцов В.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р., Потрясаев С.А., Семенов А.Е.	
Информационные технологии и система для выполнения междисциплинарных проектов и создания тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли	25
Зеневич С.Г., Газизов И.Ш., Чурбанов Д.В., Спиридонов М.В., Родин А.В.	
Проект компактного гетеродинного спектрометра для дистанционного зондирования парниковых газов атмосферы Земли	32
Ковалёнок В.В., Иванченков А.С., Савиных В.П., Баранова Л.А., Авакян С.В.	
Земля и Космос: возможности пилотируемой космонавтики при решении проблем климатологии и безопасности внемагнитосферных миссий	37
Мателенок И.В., Мелентьев В.В.	
Моделирование трехмерной структуры растительного покрова тундр для обеспечения спутникового мониторинга опасных явлений и процессов	42
Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л.	
Внезапные стратосферные потепления в северном и южном полушариях по микроволновым измерениям со спутников Метеор-М № 2 и № 2-2	47
Поздняков Д.В., Чепикова С.С.	
Феномен массовых цветений <i>E. huxleyi</i> в Мировом океане: многолетние спутниковые исследования в субарктических и арктических морях	53
Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Лупян Е.А., Радченко М.В., Сычугов И.Г.	
ЦКП «ИКИ-Мониторинг», текущие возможности и направления развития	58
Сушкевич Т.А.	
«Будущее Земли»: радиационный фактор и сопряженные задачи климата, экологии, эволюции Земли и космоса (посвящается 100-летию К.Я. Кондратьева)	64
Тимофеев Ю.М.	
Дистанционные методы исследования атмосферы (кафедра физики атмосферы ЛГУ + СПбГУ)	68
Тронин А.А., Горный В.И., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш.	
Спутниковое картирование тепловой реакции экосистем Северной Европы на изменение климата	72
Шилин Б.В., Груздев В.Н.	
Материалы видеоспектральной съёмки	79
Янковский В.А., Мануйлова Р.О.	
Модель кинетики возбужденных продуктов фотолиза озона и молекулярного кислорода солнечным излучением в диапазоне длин волн 100 – 900 нм в мезосфере и нижней термосфере	86

Секция 2 «Изменчивость климата и дистанционное зондирование» 95

Гаврилов Н.М.

Мезомасштабная изменчивость средней атмосферы по данным ГНСС спутников 95

Груздев В.Н., Шилин Б.В.

Место видеоспектральной съёмки среди методов дистанционного зондирования 102

Газизов И.Ш., Зеневич С.Г., Бендеров О.В., Спиридонов М.В., Родин А.В.

Разработка когерентного многоэлементного изображающего лидара ближнего ИК диапазона 108

Ивахов В.М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Кароль И.Л., Киселев А.А., Зинченко А.В.,
Лаурилла Т., Аурела М., Полищук В.Ю.

Наблюдения потоков метана на станциях Тикси (северная Якутия) и Новый Порт (п-ов Ямал).... 113

Lin Changqing, Labzovskii Lev D., Leung Mak Hugo Wai, Fung Jimmy C.H., Lau Alexis K.H, Kenea
Samuel Takele, Bilal Muhammad, Vande Hey, Joshua D., Lu Xingcheng, Ma Jun

Observation of PM_{2.5} using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in
Krasnoyarsk with limited reference monitoring 118

Лобанов В.А., Маммедов С.А., Наурозбаева Ж.К., Григорьева А.А.

Особенности изменений климата на разных пространственно-временных масштабах 127

Логинов В.Ф.

Роль космических факторов в изменении климата 132

Малинин В.Н.¹, Вайновский П.А.²

Изменчивость влагообмена между океаном и атмосферой и глобальное потепление 137

Огибалов В.П.

Радиационное выхолаживание нижней термосферы в ИК полосах CO₂ при учёте электронно-
колебательного переноса энергии от O(¹D) 144

Огурцов М.Г.

Солнечная активность и климат Земли – современные данные 150

Покровский О.М., Покровский И.О.

Трансляция медленных флуктуаций солнечной активности в колебания компонентов глобальной
климатической системы. 155

Солдатенко С.А., Ле Маршалл Д.

О влиянии спутниковой информации на точность прогнозов погоды и климата 160

Шерстюков Б.Г.

Внешние факторы долгопериодных колебаний температуры поверхности Мирового океана165

Секция 3 «Геополитика, экодинамика и экологическая безопасность».....170

Алексеев Г.В., Вязилова А.Е., Глок Н.И., Кулаков М.Ю., Харланенкова Н.Е.

Роль низких широт в потеплении Арктики. 170

Бажина Е.В., Парфенова Е.И., Чебакова Н.М.

Усыхание темнохвойных древостоев в горах Южной Сибири: локализация и возможные причины
..... 176

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Козлов А.С.,
Куйбида Л.В., Воронецкая Н.Г., Певнева Г.С.

Многолетний ход химического состава атмосферного аэрозоля в тропосфере юга Западной Сибири
..... 182

Белова Ю.В., Филина А.А., Никитина А.В.	
Изучение влияния природных факторов на продукционно-деструкционные процессы водных биоценозов	191
Бобылёв Л.П., Латонин М.М., Башмачников И.Л., Гнатюк Н.В., Радченко Ю.В.	
Арктическое усиление по данным наблюдений и климатических моделей	197
Варотсос К.А., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А.	
Новые информационно-моделирующие инструментальные технологии для оперативной диагностики Арктических вод	202
Давыдов Д.К., Дьячкова А.В., Симоненков Д.В., Фофонов А.В., Максюттов Ш.Ш., Белан Б.Д.	
Применение автоматизированного камерного метода для долговременных измерений газовых потоков в болотных экосистемах Западной Сибири	207
Донченко В.К.	
Экологическая безопасность – ключевая проблема глобальной экодинамики	214
Коваль А.В., Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Шевчук Н.О.	
Моделирование чувствительности общей циркуляции атмосферы к изменению солнечной активности в термосфере	218
Кондрик Д.В., Чепикова С.С.	
Спутниковые исследования, моделирование и прогноз цветений кокколитофор в Мировом океане	224
Леонтьев А.Л., Никитина А.В., Чистяков А.Е.	
Учет нелинейных эффектов в модели динамики популяции промысловой рыбы	228
Лысенко С.А.	
Оценки роли местного испарения и в формировании осадков на территории Беларуси	234
Лысенко С.А., Логинов В.Ф.	
Оценки воздействия экваториальной зоны Тихого океана на температуру воздуха над сушей Северного полушария	240
Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю., Березина О.А., Деменев А.Д.	
Современные методы изучения экологической ситуации в горнодобывающих районах (на примере Кизеловского угольного бассейна)	245
A. Mahura, R. Nuterman, A. Baklanov, R. Makkonen, M. Boy, T. Petäjä, H.K. Lappalainen, S. Zilitinkevich, M. Kulmala	
Multi-Scale And -Processes Online Integrated Modelling For Environmental Applications.....	250
Морозова С.В., Алимбиева М.А.	
Оценка вклада углекислого газа в наблюдаемые климатические изменения статистическими методами	254
Намгаладзе А.А.	
Землетрясения и верхняя атмосфера; теория и наблюдения	259
Неробелов Г.М., Седеева М.С., Махура А.Г., Нутерман Р.Б., Смышляев С.П.	
Enviro-HIRLAM моделирование переноса атмосферных загрязнителей и воздействия аэрозолей на метеорологические параметры над северо-западной частью России и Северной Европой	264
Панькин Д.В., Колесников И.Е., Васильева А.А., Пилип А.Г., Зигель В.В., Маньшина А.А., Агаева Т.	
Применение метода спектроскопии комбинационного рассеяния в экологическом анализе	269

Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М. Долгопериодные колебания климата на территории Приволжского федерального округа	276
Попов А.А., Гаврилов Н.М., Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Колтовской И.И. Внутренние гравитационные волны в области мезопаузы по измерениям ночной эмиссии гидроксила вблизи Якутска	281
Синькевич А.А., Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Михайловский Ю.П., Попов В.Б. Исследование грозо-градового облака с использованием данных зондирования со спутника Метеосат	287
Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Ляпунова И.А., Проценко С.В. Анализ возможности применения предложенной гидрофизической модели для расчёта объёмов и площадей зон загрязнения взвесью и другими примесями	291
Yuri. N. Skiba, David Parra-Guevara Methods of estimation and control of contaminants	295
Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. Об управлении климатом.....	301
Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Никитина А.В., Литвинов В.Н. Математическое моделирование гидродинамики и процессов переноса солей и тепла в мелководных водоёмах.....	307
Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Кузнецова И.Ю., Проценко Е.А. Моделирование процесса транспорта донных материалов в русловых потоках.....	312
Филатов Н.Н. Вклад академика К. Я. Кондратьева в лимнологию.....	316
Шаров А.Н. Фитопланктон северных озёр в условиях климатической изменчивости	320
Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледяного покрова Арктики за последние десятилетия.....	324

Сборник статей

Коллектив авторов

Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос»
к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева. 20-21 октября 2020 года, Санкт-Петербург.
Под общей редакцией Биненко В.И.

Оригинал-макет подготовлен издательским отделом ООО "Мономакс",
197183, Санкт-Петербург, Сестрорецкая ул., 2А, пом. 11Н,
тел. (812) 335-20-55
Дизайн, вёрстка: Руденко Н.В.

Подписано в печать 19.10.2020. Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 50 экз.
Заказ 10603.

Отпечатано в типографии ООО «РПК «АМИГО-ПРИНТ»,
198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, 21,
(812) 313-95-76