

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ
«АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА» (MCARD – 2025)**
23 – 26 июня 2025

ТЕЗИСЫ

**Санкт-Петербург
2025**

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ.....	1
СЕКЦИЯ 1. СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОВЕРХНОСТИ.....	9
СЕКЦИЯ 2. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ в РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА.....	33
СЕКЦИЯ 3. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ.....	63
СЕКЦИЯ 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ с ОБЛАКАМИ и АЭРОЗОЛЕМ.....	69
СЕКЦИЯ 5. ОЗОНОСФЕРА – МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗЫ.....	89
СЕКЦИЯ 6. РАДИАЦИОННАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ и РАДИАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ в МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ и КЛИМАТА.....	100
СЕКЦИЯ 7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН, МАКРОЦИРКУЛЯЦИЯ и ДИНАМИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ в АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ.....	118
СЕКЦИЯ 8. СТРУКТУРА и СОСТАВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ.....	145
СЕКЦИЯ 9. РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ в ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ.....	161
СЕКЦИЯ 10. ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СОДЕРЖАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИ и ЭКОЛОГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ГАЗОВ И АЭРОЗОЛЕЙ в ТРОПОСФЕРЕ.....	176

ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ

Элементы стохастической структуры облачных полей

Георгий С. Голицын¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Приглашенный доклад

gsg@ifaran.ru

Два стохастических элемента полей облачности были недавно описаны в литературе: 1) отношение длины периметра облака к его площади и 2) дифференциальное распределение горизонтальных длин облаков и голубых полосок неба между ними. Всё это с точностью до немногих процентов можно понять в рамках теории случайных движений Колмогорова 1934 г. Из второго момента распределения вероятности для площади (облака) следуют гистограммы и затем дифференциальные распределения горизонтальных длин. Длины периметров облаков пропорциональны их длинам, но коэффициент пропорциональности C зависит от безразмерного параметра подобия Π : $C=C(\Pi)\sim\Pi$. Это и объясняет эмпирические зависимости.

Спутниковые данные дистанционного зондирования атмосферы в задачах численного прогноза погоды

Александр Б. Успенский¹ , Михаил Д. Цырульников²

¹ Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

Приглашенный доклад

abusp@mail.ru

Выполнен обзор современного состояния и перспектив развития спутниковых наблюдательных систем дистанционного зондирования атмосферы Земли (ДЗА), включая методы и средства получения информационной продукции ДЗА, а также ее применение в задачах численного прогноза погоды.

В первой части доклада рассмотрены существующие методы и средства ДЗА отечественных и зарубежных спутниковых систем, предназначенные для получения информационной продукции по вертикальным распределениям температуры и водяного пара в атмосфере, а также двухмерным (2D) полям векторов ветра в тропосфере. В качестве перспективного направления развития спутниковых методов ДЗА обсуждается опыт использования измерений гиперспектральных ИК-зондировщиков (в каналах поглощения водяного пара), установленных на полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутниках, для определения трехмерных (3D) полей векторов ветра.

Вторая часть доклада посвящена обзору работ по использованию спутниковых измерений и продуктов ДЗА в системах усвоения метеорологических данных, связанных с подготовкой начальных данных для моделей прогноза погоды. Обсуждаются методические проблемы эффективного усвоения данных микроволновых и инфракрасных измерений, а также информационных продуктов ДЗА о ветре по движению облаков и полям влажности. Анализируется вклад различных видов спутниковых наблюдений в прогноз погоды. Приводятся результаты усвоения данных измерений с отечественных полярно-орбитальных спутников в системе усвоения данных Гидрометцентра России. Обсуждаются перспективы использования данных наблюдений о ветре с высокоорбитальных спутников Арктика.

Исследование содержания и потоков климатически важных газов для территории Санкт-Петербурга

Мария В. Макарова¹, Дмитрий В. Ионов¹, Стефани Ч. Фока¹, Владимир С. Косцов¹, Анатолий В. Поберовский¹, Александр В. Поляков¹, Хамуд Х. Имхасин¹, Владислав О. Крель¹, Егор П. Рябушко¹, Евгений В. Абакумов¹, Евгений В. Шевченко¹, Сергей В. Микушев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

Приглашенный доклад

m.makarova@spbu.ru

Глобальные изменения климата являются одной из важнейших научных, социальных и экономических проблем современности. Чтобы оценить значимость этих изменений и понять связанные с ними физические и химические процессы, необходим мониторинг атмосферного содержания климатически важных газов и их потоков в атмосферу. В докладе представлены основные итоги долговременных стационарных Фурье-спектрометрических наблюдений в СПбГУ, направленных на изучение временных изменений газового состава атмосферы. Приведены результаты мобильных измерительных кампаний EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment) 2019-2024 годов по оценке выбросов климатически активных газов с территории Санкт-Петербургской агломерации. Сделан краткий обзор исследований, развивающихся на кафедре физики атмосферы СПбГУ и посвященных определению потоков парниковых газов с использованием пульсационных и камерных измерений для природных и урбанизированных экосистем.

Финансирование и благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00033, <https://rscf.ru/project/24-27-00033/>. Исследования проведены с использованием аппаратуры ресурсного центра "Геомодель" (Научный парк СПбГУ).

Исследование проведено при поддержке:

1. "РНФ", грант № 24-27-00033

Интерпретация возмущений параметров верхней атмосферы во время и после окончания продолжительных явлений космической погоды

Максим В. Клименко^{1,2} , Константин Г. Ратовский³ , Владимир В. Клименко¹ , Федор С. Бессараб^{1,2} , Андрей В. Дивин² , Куприян В. Белюченко^{1,2} , Евгений В. Розанов²

¹ Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова

² Санкт-Петербургский государственный университет

³ Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Приглашенный доклад

maksim.klimenko@mail.ru

В данном докладе представлены результаты исследования вариативности параметров верхней атмосферы в периоды геомагнитных бурь и солнечных протонных событий. Нами были рассмотрены вариации электронной концентрации в ионосфере над отдельными станциями и глобального электронного содержания по данным наблюдений и по результатам модельных расчетов. В работе обсуждается вопрос о модельном воспроизведении, интерпретации физических процессов в верхней атмосфере и влиянии атмосферно-ионосферного взаимодействия на ионосферные возмущения в периоды геомагнитных бурь и солнечных протонных событий. Сравнение ионосферной изменчивости, полученной по результатам расчетов моделей верхней атмосферы (ГСМ ТИП) и всей атмосферы (EAGLE), показало, что атмосферно-ионосферное взаимодействие может играть одну из ключевых ролей в изменчивости ионосферы на средних широтах.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986

Модель климата ИВМ РАН: современное состояние, перспективы развития и участие в программе сравнения климатических моделей CMIP7

Евгений М. Володин¹

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук

Приглашенный доклад

volodinev@gmail.com

Рассматривается модель климатической системы ИВМ РАН, которая состоит из двух основных блоков: модели общей циркуляции атмосферы, включая блок поверхности суши и почвы, и модели общей циркуляции океана и морского льда. Также модель включает в себя воспроизведение компонентов углеродного цикла, аэрозольный блок, параметризацию электрических явлений. Модель может включать в себя также блоки химии атмосферы, биохимии океана, и другие. Рассматривается воспроизведение моделью современного климата и его изменений начиная с 19 века. Модель в основном правильно воспроизводит наблюдаемые изменения, включая глобально осредненную приземную температуру и ее географическое распределение, температуру стратосферы, поглощение тепла океаном.

Рассматривается проблема неопределенности равновесной чувствительности к удвоению концентрации CO₂ для реальной климатической системы, а также модельная равновесная чувствительность и неравновесный отклик.

Приводятся результаты воспроизведения моделью изменений климата и углеродного цикла, включая углерод океана, растений, почвы и атмосферы. Делается вывод об основных источниках неопределенности при воспроизведении углеродного цикла.

Рассматриваемая модель климата используется также в прогнозах аномалий погоды и климата на срок 1-3 месяца и 1-5 лет, которые стартуют соответственно раз в месяц и раз в год. Приводятся некоторые результаты воспроизведения моделью сезонных аномалий погоды и аномалий климата при расчете на 1-5 лет с реальных начальных состояний климатической системы.

Программа по сравнению климатических моделей CMIP7, участие в которой планируется в 2025-2027г, включает в себя набор обязательных численных, экспериментов а также набор быстрых экспериментов (fast track), план которых согласуется с написанием 7-го ОД МГЭИК, и различных подпроектов. Быстрые эксперименты включают в себя воспроизведение современного климата и его изменений, и обширный набор идеализированных экспериментов, цель которых - исследование различных механизмов и обратных связей в модельной климатической системе. Важным блоком в этой программе экспериментов является вычисление эффективного радиационного форсинга от различных антропогенных воздействий на климатическую систему. Рассматривается техника вычисления эффективного радиационного форсинга, а также вычисленные форсинги для антропогенных аэрозолей и парниковых газов.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 25-17-00203

40 Лет с "Озоновой Дырой": Что в Перспективе?

Сергей П. Смышляев¹, Евгений В. Розанов^{2,1}

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

² Санкт-Петербургский государственный университет

Приглашенный доклад

smyshl@rshu.ru

В 1985 году в Антарктике было обнаружено масштабное истощение озонового слоя, приписанное выбросам галогеносодержащих соединений. В дальнейшем похожие явления, но в меньших масштабах, фиксировались и в других регионах, в частности, в Арктике. Последующие усилия научного сообщества и политиков позволили выявить физические и химические процессы, лежащие в основе этого явления, и определить способ предотвращения катастрофического будущего. Реализованные в 1987 году Монреальским протоколом ограничения на озоноразрушающие вещества помогли замедлить истощение озонового слоя и даже стабилизировать ситуацию. Использование современных химико-климатических моделей Земной Системы позволило воспроизвести формирование озоновых аномалий в разных регионах и оценить относительный вклад физических и химических процессов в их развитие.

В докладе приводятся результаты численного моделирования формирования озоновых аномалий в разных районах Земного шара и оценки относительного вклада уровня галогеносодержащих соединений, а также таких явлений как устойчивость полярного вихря, денитрификация и дегидратация в развитие озоновых дыр в Антарктике и мини-дыр Арктике. Значительное внимание в докладе посвящается анализу обнаруженного в 2018 году истощения озона в тропической и средней широтной стратосфере, которое пока не получило убедительного объяснения. Отсутствие в современных химико-климатических моделях некоторых химических реакций и использование неточных схем переноса примесей могут быть ответственны за неспособность корректно воспроизводить эту негативную тенденцию.

Несмотря на усилия мирового сообщества по ограничению выбросов в атмосферу озоноразрушающих веществ, полное восстановление озонового слоя в будущем пока не предрешено. В докладе обсуждается как одновременное изменение климата и химического состава атмосферы в будущем может повлиять на состояние озонового слоя при разных сценариях содержания парниковых и озоноразрушающих газов. Также обсуждаются другие проблемы, ставящие под угрозу будущее восстановление озонового слоя, которые могут быть связаны с колоссальным увеличением количества запусков космических ракет, масштабными лесными пожарами, мощными извержениями вулканов или широко обсуждаемыми мерами по вмешательству в климат, основанными на забросе в стратосферу соединений, содержащих серу.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986
2. "Министерство науки и высшего образования РФ", грант FSZU-2023-0002
3. "Российский научный фонд", грант 24-17-00230

Концентрации и потоки парниковых газов над территорией Западной Сибири и Российской Арктики

Борис Д. Белан¹, П.Н. Антохин, М.Ю. Аршинов, С.Б. Белан, Д.К. Давыдов, Г.А. Ивлев, А.В. Козлов, Д.В. Симоненков, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

Приглашенный доклад

bbd@iao.ru

По заключению Международной группы экспертов по изменению климата ООН одной из основных причин глобального потепления является увеличение концентрации парниковых и других газов, поступающих как от антропогенных, так и природных источников. Поэтому точная оценка их выбросов и стоков, перераспределения между атмосферой, океаном и земной биосферой имеет решающее значение для разработки климатической политики и прогнозирования будущих его изменений. Однако, несмотря на большой объем выполненных исследований бюджета парниковых газов на планете в его оценке все еще сохраняется значительная неопределенность. Это говорит о том, что не все источники и стоки полностью учтены в ходе проведенных расчетов.

В ИОА СО РАН ведется мониторинг концентрации парниковых газов в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири с помощью 6 высотных башен, расположенных, как в южных, так и Арктическом районах. На 3 постах комплексного мониторинга проводится мониторинг 6 основных примесей воздуха, которые обозначены Всемирной организацией здравоохранения. Ежемесячно выполняются полеты самолета-лаборатории Ту-134 или Як-40 Оптик по измерению загрязняющих атмосферу газов, аэрозоля и сажи. При обслуживании 6 башен осуществляется измерение концентрации парниковых газов с помощью автомобиля-лаборатории в приземном слое воздуха вдоль маршрута поездки. В 2024 году начаты измерения потоков парниковых газов с поверхности реки Обь камерным методом, а также в вегетационный период продолжался мониторинг потоков в обсерватории «Фоновая» и на стационаре «Плотниково».

Проведенный анализ показал, что в приземном слое воздуха, в зависимости от района тренд концентрации углекислого газа в приземном слое воздуха составлял $2,47 - 2,65 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$, рост содержания метана происходил со скоростью $5,0 - 12,6 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$. Это превышает среднепланетные значения. Годовой прирост содержания CO_2 по Западной Сибири превышает усреднённое по земному шару значение, однако близко к данным обсерватории Мауна-Лоа для марта и июня за 2023-2024 гг.: $\Delta = 4,4 \text{ млн}^{-1}$ и $\Delta = 3,2 \text{ млн}^{-1}$, соответственно. В августе 2024 г. концентрация CO_2 , наоборот, в среднем почти на 2 млн^{-1} была ниже, чем в предыдущем году, что могло стать результатом стимуляции дневного поглощения углекислого газа наземными экосистемами Сибири, вызванной рекордно теплым летом 2024 г. Наименьшая изменчивость характерна для N_2O . В среднем рост концентрации происходит со скоростью $0,80 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$, что соответствует средним значениям по планете.

В свободной атмосфере над территорией юга Западной Сибири также продолжался рост концентрации парниковых газов на всех высотах. Для углекислого газа он составляет в среднем $2,21 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$, а скорости увеличения его концентрации максимальна на уровне $0,5 \text{ км}$ $2,24 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ и минимальна на высоте 3 км - $2,19 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$. По-прежнему сохраняется повышенная скорость роста концентрации CO_2 в пограничном слое атмосферы летом, где она достигает $2,50 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$. Увеличение содержания метана также наблюдается во всей тропосфере и составляет в среднем $9,1 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$. Максимальная скорость роста фиксировалась в пограничном слое - $9,7 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$, минимальная - $9,0 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ регистрируется на высоте $4-5,5 \text{ км}$.

Атмосферная радиация в модели прогноза погоды и климата ICON: современное состояние и перспективы развития

Наталья Е. Чубарова^{1,2}, Марина В. Шатунова^{1,2}, Дарья А. Пискунова^{1,2}, Юлия О. Шувалова², Алексей А. Полюхов^{1,2}, Владимир В. Копейкин², Инна А. Розинкина², Гдалий С. Ривин^{2,1}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

Приглашенный доклад

natalia.chubarova@gmail.com

В докладе обсуждаются результаты исследований радиационных эффектов атмосферного аэрозоля, некоторых парниковых газов и облачности, полученные в численных экспериментах с использованием российских конфигураций ICON-Ru негидростатической модели ICON, которая применяется в краткосрочном численном прогнозе погоды в рамках системы COSMO-Ru Гидрометцентра России. Модель прогноза погоды и климата ICON в последнее время становится одной из самых точных и востребованных моделей в мире. Вследствие этого, дальнейшее улучшение качества моделирования компонентов радиационного баланса в атмосфере является актуальной задачей, способствующей совершенствованию прогноза важных метеорологических характеристик. Расчеты проводились с использованием системы сеток (в том числе вложенных) с шагом от 13 км (для глобальной конфигурации) до 1 км.

Для условий ясного неба были оценены радиационные эффекты, антропогенное радиационное воздействие и скорость радиационного нагрева наиболее важных антропогенных примесей за последние 20 лет относительно их доиндустриального уровня для разных сезонов года на примере московского региона. Определены особенности вертикальных профилей радиационного воздействия в коротковолновом и длинноволновом спектральных диапазонах и их величины на нижней и верхней границах атмосферы в зависимости от высоты Солнца и альбедо поверхности. Показано влияние вертикальной структуры аэрозоля на радиационные характеристики атмосферы в сравнении с данными измерений.

Для облачных условий была оценена эффективность описания трехмерных (3D) радиационных эффектов облаков при использовании алгоритма SPARTACUS в автономной радиационной схеме ECRAD, а также учёта дополнительного облачного состояния. Обсуждаются физические механизмы, лежащие в основе выявленных закономерностей. Приводятся результаты моделирования потоков солнечного излучения в прогностической модели ICON с использованием разных методов расчета атмосферной радиации в различных облачных условиях.

Рассматривается влияние непрямых эффектов аэрозоля на облачность и их воздействие на солнечную радиацию. Показано, что увеличение ядер конденсации в облаке может привести к уменьшению солнечной радиации у земной поверхности на 10-12 %. В то же время главной причиной расхождения между измерениями и данными модельных расчетов является неточное описание пространственной структуры облаков и доли прямого солнечного излучения.

Дополнительно обсуждаются особенности воспроизведения аномально высоких значений длинноволнового баланса и его связей с прогнозом температуры воздуха у поверхности. Рассматриваются наиболее важные факторы, влияющие на формирование указанного явления.

Оценивается также влияние радиационных эффектов на прогноз приземной температуры воздуха. Даются оценки качества расчетов коротковолновой и длинноволновой радиации. Обсуждаются причины погрешностей и перспективы развития радиационных схем в конфигурациях ICON-Ru. Исследование проведено в рамках научно-исследовательской работы Росгидромета, тема № 125032004255-7 и МГУ имени М.В.Ломоносова, тема НИР №121051400081-7.

СЕКЦИЯ 1. СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОВЕРХНОСТИ

Председатель: д.ф-м.н. **Успенский А.Б.** (Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии Планета, Москва, Россия)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. **Нерушев А.Ф.** (НПО “Тайфун”, Обнинск, Россия), д.ф.-м.н.

Поляков А.В. (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Устные доклады

«Эпоха Келдыша»: первое «рукопожатие» СССР и США в космосе. К 50-летию проекта «Союз-Аполлон».

Тамара А. Сушкевич¹

¹ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук

tamaras40@yandex.ru

В 2025 году начались глубинные геополитические изменения в мире и восстановление полномасштабных дипломатических отношений между Россией и США. В честь 50-летия первого рукопожатия в космосе советского и американского экипажей «Союз-Аполлон» крайне ВАЖНО вспомнить Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911-24.06.1978) - **Академика и Лидера по прикладной математике с 35 лет (1946), Главного Теоретика космонавтики и Главного по ЭВМ (1947-1978), Главного математика страны (1951-1978), создателя и первого директора ПЕРВОГО в мире Института прикладной математики (1953-1978), первого Председателя Межведомственного научно-технического совета по космическим исследованиям при АН СССР в статусе министра и генерала (1959-1978), лучшего Президента Академии наук СССР (1961-1975), организатора Интеркосмоса (1966-1978), единственного математика трижды Героя Социалистического Труда (1956, 1961, 1971).** М.В.Келдыш сыграл ключевую роль в организации международного научного сотрудничества в космосе и реализации первой советско-американской космической Программы ЭПАС (Экспериментальный полет «Аполлон-Союз»). Стыковка и контактное взаимодействие «Союза» и «Аполлона» несомненно исторические и явились прообразом первой международной космической станции (МКС), создание которой началось в 1989 году. С 1998 года МКС на земной орбите - это самый дорогой и амбициозный проект в области пилотируемой космонавтики. О Программе ЭПАС (англ. *Apollo-Soyuz Test Project (ASTP)*) необходимо помнить, чтобы по достоинству оценить значимую роль учёных и лично Президента АН СССР М.В. Келдыша в снижении напряженности советско-американских отношений в годы разрядки «холодной войны» и в должной мере воспринимать роль международного научно-технического сотрудничества в космических проектах в настоящее время.

Первая советско-американская Программа ЭПАС была подготовлена и реализована по инициативе и при активном участии академика М.В.Келдыша со стороны СССР, а со стороны США - NASA (National Aeronautics and Space Administration) - Национального управления США по аeronавтике и исследованию космического пространства, Агентства, принадлежащего правительству США и занимающегося авиационными, космическими и астрофизическими исследованиями.

В рамках ЭПАС выполнялась научная программа, связанная с исследованиями воздействия войны во Вьетнаме на окружающую среду и климат, где кроме «ковровых бомбажек» с широким применением напалма, выжигавших десятки гектаров земли, были апробированы сценарии «климатической» и «экологической» войны. 30.04.1975 армия США прекратила военные действия. Война была закончена, но в совместном полете в июле 1975 года научная программа была продолжена - оценивались последствия войны 1955-1975 гг. Автор доклада принимала участие в проекте ЭПОС совместно с Институтом физики атмосферы АН СССР и Абастуманской астрофизической обсерваторией - научно-исследовательским учреждением в Грузии, основанном в 1932 году как первая высокогорная астрофизическая обсерватория СССР. Исследовались аэрозольные и газовые загрязнения атмосферы и их трансграничный перенос. Впервые проведены панорамные съемки стрatosферы атмосферы протяженностью около 30 тысяч км с учетом поляризации излучения.

Глобальный мониторинг температуры поверхности океана по данным спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ

Анастасия О. Масляшова^{1,2}, Александр Б. Успенский¹

¹ Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

amas101001@mail.ru

В состав целевой аппаратуры полярно-орбитальных космических аппаратов (КА) серии МЕТЕОР-М (КА № 1, 2, 2-2, 2-3, 2-4 и последующие) входит микроволновой радиометр МТВЗА-ГЯ с функциями сканера и атмосферного зондировщика, измерения которого предназначены для дистанционного определения геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности, в том числе, глобального мониторинга температуры поверхности океана (ТПО). Радиометрические каналы сканера МТВЗА-ГЯ имеют рабочие частоты в окнах прозрачности атмосферы 10,6, 18,7, 23,8, 31,5, 36,5, 42,0, 48,0 и 91,65 ГГц с вертикальной и горизонтальной поляризацией, а, начиная с КА МЕТЕОР-М № 2-3 (запущен в 2019г.), состав измерений МТВЗА-ГЯ дополнен на экспериментальной основе сканерными каналами с частотами 6,9 и 7,3 ГГц.

В докладе рассмотрены разработка и применение модифицированного по сравнению с [1] нейронно - сетевого алгоритма типа MLP для определения ТПО по данным МТВЗА-ГЯ с КА МЕТЕОР-М № 2-4 (запущен в 2024г.). Входными данными для MLP являются антенные температуры T_a , измеренные в пяти вертикально поляризованных каналах МТВЗА-ГЯ с частотами 10,65, 18,7, 23,8, 31,5, 36,5 ГГц, которые, согласно теоретическим оценкам, наиболее чувствительны к вариациям ТПО. Отказ от использования в качестве предикторов радиояркостных температур T_b связан со значительными систематическими расхождениями T_a и T_b и желанием избежать влияния дополнительных ошибок, вносимых процедурой внешней калибровки при переходе от шкалы T_a к шкале T_b . При разработке нейронно-сетевого алгоритма были выбрана четырехслойная односторонняя сеть с функцией активации RELU на трёх скрытых слоях и линейной функцией активации нейронов на выходном слое. Число нейронов в скрытых слоях составляет 40, 30 и 15. Обучение нейронной сети выполнено на выборке «пар», состоящих из синхронных, пространственно совмещённых антенных температур T_a и значений ТПО по наблюдениям морских буев из базы ICOADS. Объем обучающей выборки составил 6000 пар, территория для формирования выборки была ограничена с 60° ю. ш. по 60° с. ш. и с 75° з. д. и по 30° в. д. Были использованы данные четырех дней: 15.07, 15.08, 30.09, 10.10 2024 года.

Приведены примеры карт спутниковых оценок ТПО глобального покрытия, построенных по данным МТВЗА-ГЯ за 01.11.2024 и по «среднеклиматическим» значениям ТПО, полученным по данным реанализа ERA5. Верификация спутниковых оценок ТПО проводилась сравнением с ближайшими по месту и времени наблюдениями морских буев после применения процедуры фильтрации оценок с грубыми отклонениями от «среднеклиматических» оценок ТПО, т. е. превышением среднеклиматической величины ТПО более, чем на +/- 3 стандартных отклонения. Стандартные отклонения посчитаны для каждого узла сетки климатического поля, полученного по данным ERA5. Процедура фильтрации позволяет сохранить более 65% спутниковых оценок ТПО. Величины среднеквадратичной ошибки картирования ТПО по акваториям Земного шара в широтной зоне +/- 60 град. за 01. 11. 2024г. меняются в диапазоне 1,0 - 2,0 С в зависимости от зоны зондирования, что, с учетом достаточно высокого уровня инструментального шума данных МТВЗА-ГЯ, подтверждает работоспособность описанного подхода.

1. Масляшова А.О., Успенский А.Б. Картирование температуры поверхности океана по данным микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-4 // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2024. С. 46. DOI 10.21046/22DZZconf-2024a

Наукастинг движения облачности по данным КА Himawari-9 с использованием комбинированного нейросетевого подхода

Владислав Д. Блощинский^{1,2}, Александр И. Андреев^{1,2}, Анастасия В. Бородицкая^{1,2}, Сергей И. Мальковский¹

¹ Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

² ДЦ "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"

v.bloshchinsky@dvrcpod.ru

Наукастинг движения облачности представляет собой важное направление современной метеорологии, задача которого сводится к анализу изменений облачного покрова на временных интервалах от нескольких минут до нескольких часов, что имеет важное значение для различных прикладных задач, таких как прогноз конвективных процессов, анализ опасных атмосферных явлений (например, гроз, шквалов или ливней), обеспечение безопасности авиации, оптимизация сельскохозяйственных работ и планирование работы солнечных батарей. Разработка эффективных методов наукастинга, повышающих его точность и заглавовременность, становится неотъемлемой частью научных исследований в области метеорологии. Для реализации наукастинга применяются различные подходы, в том числе на основе численных моделей прогноза погоды, а также алгоритмы, основанные на анализе спутниковых изображений. Прогностические модели, хоть и обладают высокой точностью, требуют значительных вычислительных ресурсов и объемов исходной информации, что делает их применение затратным и трудоемким. Альтернативным решением является использование методов анализа спутниковых данных, таких как оптический поток или нейронные сети. Представленный в данной работе алгоритм наукастинга облачности был разработан на основе нейронных сетей, которые хорошо себя зарекомендовали в анализе сложных пространственно-временных зависимостей. Исследование проводилось с использованием данных канала с центральной длиной волны 11,2 мкм прибора AHI (Advanced Himawari Imager), установленного на космическом аппарате Himawari-8/9, позволяющего получать изображения в видимом и инфракрасном диапазоне с пространственным разрешением 2 км. Разработанный алгоритм представляет собой комбинированный подход, основанный на применении двух моделей наукастинга, адаптированных для решения задач прогнозирования движения и эволюции облачности. Основой предлагаемого подхода стала архитектура NowcastNet, предназначенная для прогнозирования осадков. Взятый из этой модели блок генератора был дополнен модулем, позволяющим учесть влияние подстилающей поверхности. Генератор был обучен как детерминистическая модель, которая способна давать наиболее точный прогноз направления движения объектов и их интенсивности. Однако, из-за усреднения выходных данных, этот подход может приводить к размытию прогнозируемых облачных образований. Для повышения качества прогноза была добавлена вторая часть алгоритма, основанная на модели CasFormer. Эта диффузионная статистическая модель используется для постобработки результатов прогноза с целью улучшения детализации, контрастности и общего восприятия изображений. Таким образом комбинация детерминистического генератора и статистической модели позволила достичь высокой точности прогноза, сохраняя при этом детали облачных структур. Разработанный алгоритм позволяет выполнять прогноз движения облачности на срок до 3 часов с интервалом 10 минут. Проведенная оценка качества работы разработанного алгоритма показала, что в среднем для всех изображений метрика RMSE (Root MeanSquared Error) составила около 7 K, SSIM (Structural Similarity Index) – 0,75, PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) – 27,1.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский Научный Фонд", грант 23-77-00011

Изменчивость характеристик высотных струйных течений по спутниковым данным. Модели и прогнозы

Александр Ф. Нерушев¹, Константин Н. Вишератин¹, Роман В. Ивангородский¹

¹ Научно-производственное объединение «Тайфун», Россия

nerushev@gratypoon.ru

Высотные струйные течения (СТ) – неотъемлемый и очень важный элемент общей циркуляции атмосферы. В них сосредоточена основная кинетическая энергия воздушной оболочки Земли. Скорость ветра в них может превышать 100 м/с. С ними связывают проявление некоторых аномальных погодных явлений.

В докладе рассматривается пространственно – временная изменчивость характеристики СТ Северного полушария в зоне обзора европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения с подспутниковой точкой 0 град. Определенные по спутниковым данным области струйного течения представляют собой сечения СТ горизонтальной плоскостью на уровне приблизительно 350 гПа. Вычислялись следующие основные характеристики СТ: максимальная скорость ветра (V_m) на оси, широта (φ) и долгота (λ) центра области СТ, его средняя площадь (S), максимальный градиент (сдвиг) горизонтальной скорости ветра на циклонической (G_c) и антициклонической (G_a) сторонах, а также эффективное время «жизни» СТ (τ).

С использованием корреляционного и кросс-вейвлетного анализов рассмотрены связи характеристик СТ с температурой верхней тропосферы (T) на разных уровнях и площадью арктического морского льда (S_{ice}). Наибольшая связь с T характерна для S и φ . При этом вариации T и S происходят в противофазе, а T и φ – в фазе.

Значимая связь межгодовых вариаций S_{ice} наблюдается также с площадью S и широтой φ центра области СТ. Вариации годового колебания S_{ice} и S происходят преимущественно в фазе, а колебания S_{ice} и φ близки к противофазе. При этом вариации S опережают вариации S_{ice} на 1,5-2,5 мес.

Исследована связь характеристик СТ с крупномасштабными атмосферными процессами. При общей тенденции к синхронности годовых вариаций S и Североатлантического колебания (NAO) наблюдаются два временных промежутка, когда эта тенденция нарушается или ослабевает. Первый период (2009 – начало 2010 гг.) предшествует известным аномальным погодным явлениям 2010 года, охватившим большую часть Евразии, второй период (2013 год) может быть связан с аномалиями погоды в США. Сопоставление вариации индекса NAO и широты φ центра области СТ демонстрирует их противофазность. При этом особенности 2013 г. сохраняются.

Сопоставление вариаций характеристик СТ и температурных аномалий в Европе и на европейской территории России (ЕТР) показало, что при смещении центра СТ на север относительно среднего многолетнего положения на значительной территории Европы и в северных районах ЕТР среднемесячная температура с большой степенью вероятности опускается ниже климатической нормы, и наоборот.

Построены статистические модели временной изменчивости параметров СТ, в качестве предикторов в которых выступают температурные характеристики тропосферы, площадь арктического морского льда и индексы крупномасштабных процессов. Модели описывают от 50 до 70 % временной изменчивости S , φ и V_m . На основе использования модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего выполнено прогнозирование будущих изменений характеристик СТ на сроки до 4 лет.

Прибор Озонометр-ТМ для космических аппаратов «Ионосфера-М»

Юрий С. Доброленский¹, Никита А. Вязоветский¹, Илья А. Дзюбан¹, Олег И. Кораблев¹, Дмитрий В. Ионов², Андрей Е. Шаталов³, Алексей И. Викторов³

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

² Санкт-Петербургский государственный университет

³ Научно-производственное предприятие «Астрон Электроника», Россия

dobrolenskiy@cosmos.ru

В настоящее время в рамках проекта «Ионозонд-2025» создан прибор Озонометр-ТМ для мониторинга озонасферы Земли. Прибор входит в состав комплекса целевой аппаратуры космических аппаратов «Ионосфера-М» №№ 3 и 4, запуск которых должен состояться в 2025 году.

Задачей прибора является мониторинг общего содержания озона на основе надирных спутниковых измерений отраженного и рассеянного света. Прибор представляет собой спектрометр УФ-видимого диапазона [1], работающий в интервале длин волн 300 – 500 нм со спектральной выборкой 0,1 нм и разрешением 0,3 – 0,4 нм. Спектральный диапазон прибора позволяет осуществлять мониторинг не только озона, но и других газов, например диоксида азота, в атмосфере Земли.

В процессе создания спектрометра были изготовлены несколько прототипов и проведено несколько серий наземных измерений. Получены оценки общего содержания озона, результаты сопоставлены с данными ближайших независимых измерений спутниковой аппаратурой [2]. К настоящему моменту прибор прошёл полный цикл наземных испытаний; два лётных образца готовы к запуску. Помимо спектральной, для лётных образцов прибора была проведена абсолютная радиометрическая калибровка с помощью эталона спектральной плотности энергетической яркости.

Кроме того, на космический аппарат «Зонд-М» предполагается установка «расширенной» модификации спектрометра, получившая название Озонометр-3. Этот вариант прибора представляет собой спектрометр со сверхшироким полем зрения (100 градусов). Он также отличается более высокой по сравнению с Озонометром-ТМ светосилой. Озонометр-3 состоит из двух каналов: УФ-канала (300 – 400 нм) и ВИЗ-канала (400 – 800 нм). В отличие от Озонометра-ТМ, обладающего точечным полем зрения, Озонометр-3 представляет собой видеоспектрометр, имеющий около 200 разрешимых элементов поперёк траектории движения космического аппарата [3]. Соответственно, вместо линейного детектора, используемого в Озонометре-ТМ, в Озонометре-3 предполагается установка ПЗС- или КМОП-матрицы. Расчётное спектральное разрешение составляет 0,3 нм в УФ-канале и 0,5 нм в ВИЗ-канале. К настоящему моменту разработана оптическая схема обоих каналов прибора Озонометр-3.

Литература

1. Dobrolenskiy Y.S., Ionov D.V., Korablev O.I., Fedorova A.A., Zherebtsov E.A., Shatalov A.E., Mantsevich S.N., Belyaev D.A., Vyazovetskiy N.A., Moiseev P.P., Tchikov K.N., Krasavtsev V.M., Savushkin A.V., Rumyantsev D.M., Kananykhin I.V., Viktorov A.I., Kozyura A.V., Moryakin S.A., Poberovskii A.V. *Development of a space-borne spectrometer to monitor atmospheric ozone// Applied Optics*, 2015, v. 54, № 11, pp. 3315 – 3322.
2. Доброленский Ю.С., Ионов Д.В., Кораблёв О.И., Фёдорова А.А., Жеребцов Е.А., Шаталов А.Е., Поберовский А.В. *Наземные полевые измерения и калибровки нового спутникового спектрометра для мониторинга озонаового слоя земли // Исследование Земли из космоса*, 2017, №5, стр. 82 – 92.
3. Доброленский Ю.С., Дзюбан И.А., Иванов Ю.С., Синявский И.И., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Кораблёв О.И., Фёдорова А.А., Вязоветский Н.А. *Оптическая система перспективного*

Оценка дрейфа качества орбитальных наблюдений AIRS содержания CH₄ и CO и применение методов коррекции к многолетним рядам

Вадим С. Ракитин¹, Евгения И. Федорова¹, Наталья С. Кириллова¹, Наталья В. Панкратова¹,
Николай Ф. Еланский¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

vadim@ifaran.ru

Работа посвящена валидации спутниковых данных AIRS v6 (только IR-AIRS) по общему содержанию CH₄ и CO для восемнадцати наземных станций сети мониторинга NDACC за период с 2003 по 2022 год. Установлено, что линейный тренд разности спутниковых и наземных измерений (тренд расхождения AIRS-GR) общего содержания (ОС) CH₄ имеет отрицательное значение для всех исследованных станций. Данный эффект свидетельствует о наличии дрейфа параметров спутникового спектрометра. С использованием синхронизированных рядов измерений AIRS v6 и данных всех статистически репрезентативных станций рассчитано среднее значение дрейфа расхождения ОС CH₄, равное 1.69×10^{14} молек/см² в сутки. С использованием полученного среднего коэффициента проведена динамическая коррекция спутниковых данных. Проведено постстанционное сравнение параметров корреляции среднесуточных значений ОС CH₄ и оценок тренда по данным AIRS и наземного спектрометра NDACC до и после коррекции. Применение динамической коррекции к орбитальным данным привело к существенному улучшению согласованности обоих параметров.

Аналогичный анализ был проведен для ОС CO. Исследование показало, что исходные ряды наземных и спутниковых измерений ОС CO имеют хорошую корреляцию как для отдельных станций ($R \sim 0.8-0.9$), так и для всего набора данных ($R=0.93$). Тренд разности AIRS-GR разнонаправлен для разных точек измерений, что является следствием недооценки спутником высоких концентраций CO в приземном слое из-за выбросов от пожаров и антропогенного воздействия. Поэтому спутниковый продукт AIRS v6 ОС CO не требует проведения коррекции в рамках данного метода. В докладе также приводятся другие примеры обнаружения дрейфа параметров спутниковых приборов, в частности, для AIRS v7 (CH₄) и OMI v3 (NO₂). Разработанная методология сопоставления и коррекции орбитальных данных универсальна и может быть применена к любым многолетним спутниковым рядам.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Государственное задание", грант 125020501413-6

Использование нейросетевого подхода при определении общего и тропосферного содержания озона на основе измерений уходящего теплового излучения

Александр В. Поляков¹ , Яна А. Виролайнен¹ , Георгий М. Неробелов¹ , Светлана В. Акишина¹ , Екатерина П. Крюковских

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

a.v.polyakov@spbu.ru

Для мониторинга общего содержания озона (ОСО) и тропосферного озона (ТРО) в вертикальном столбе атмосферы глобальные непрерывные измерения могут обеспечивать только спутниковые методы дистанционного зондирования. Среди них методы, основанные на измерениях спектров уходящего теплового ИК излучения, позволяют получить информацию об ОСО и ТРО при отсутствии солнечного излучения, в том числе, в период полярной ночи. Мы рассматриваем методики получения ОСО и ТРО на основе таких спектров, измеренных прибором ИКФС-2 с борта спутника «Метеор М» № 2. Методики основаны на методах искусственных нейронных сетей (ИНС) и главных компонент. Погрешность аппроксимации ОСО при обучении с помощью ИНС в среднем близка к 3 %, в тропическом регионе она составляет менее 2 %, а в полярных регионах в зимне-весенний период возрастает до 6-8 %. Методология определения ОСО была нами неоднократно описана ранее, поэтому мы подробно анализируем в докладе ИНС только для определения ТРО. Для этого мы рассмотрели различные наборы обучающих данных и оптимизировали структуру ИНС. Погрешность аппроксимации ТРО при обучении оптимальной ИНС составляет около 3,4 е.Д..

Методики были применены для обработки спектров, измеренных со спутника «Метеор М» №2 в 2015 - 2022 годах. Полученные значения ОСО сравнивались с данными прибора TROPOMI на спутнике S5P и наземных наблюдений (приборы Добсона и Брюера, прямые измерения Солнца). Стандартные отклонения разностей составляют около 2,7% для обоих сравнений. Результаты определения ТРО сравнивались с данными станций сети IRWG-NDACC. В среднем стандартные отклонения разностей между спутниковыми и наземными наблюдениями ТРО составляют около 3 DU, что составляет ~15% от ТРО, полученных с помощью измерений FTIR. Проанализирована пространственная и временная изменчивость ОСО и ТРО, приводятся примеры результатов измерений. В данной работе мы показали, что, хотя регрессионный подход не считается оптимальным для решения обратных задач ДЗЗ, адекватность и полнота обучающего набора данных позволяет получить ценные результаты. Также хотим обратить внимание на то, что использование простейшей ИНС - перцептрона с одним скрытым слоем - позволяет получить вполне удовлетворительные результаты. Исследование выполнено при поддержке Санкт-Петербургского университета (шифр проекта 124032000025-1).

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 124032000025-1

Валидация измерений общего содержания озона с российского спутника «Арктика М»

Александр В. Поляков¹ , Юрий М. Тимофеев¹ , Владислав Д. Блощинский² , Петр М. Неробелов¹ , Юлия А. Шамилова² , Анастасия В. Бородицкая²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² ДЦ "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"

a.v.polyakov@spbu.ru

Российские космические аппараты (КА) «Арктика-М» благодаря уникальной высокоэллиптической траектории играют для полярных районов Северного полушария фактически ту же роль, что геостационарные спутники для экваториальных и среднеширотных областей Земного шара. На борту КА, помимо другой аппаратуры, установлен радиометр МСУ-ГС, выполняющий измерения в 10 спектральных каналах в видимой и инфракрасной областях спектра. Использование 3-х каналов измерений в полосе поглощения озона 9.6 мкм и в окне прозрачности атмосферы позволяет определять общее содержание озона в вертикальном столбе. Благодаря высоким пространственному разрешению (до 4 км в надир) и периодичности измерений (15 минут), прибор позволяет получать уникальную информацию о пространственно-временной изменчивости общего содержания озона в вертикальном столбе атмосферы (ОСО). Первые комплексные сравнения данных МСУ-ГС ОСО, полученные с КА серии «Арктика М», с данными независимых наземных и спутниковых измерений показали высокую потенциальную информативность прибора при исследованиях аномалий ОСО. [Тимофеев и др. 2025]. Мы сравнили ОСО, полученные с КА серии «Арктика М», с данными независимых спутниковых (прибор TROPOMI на борту КА S5P) и наземных (измерения прозрачности по прямому Солнцу на станциях озонометрической сети приборами Брюера и Добсона) и выполнили качественные сопоставления распределения ОСО с независимыми данными. Показано, что средняя разность между данными приборов МСУ-ГС и TROPOMI колеблется в разные дни измерений от 1.3 до 21.6 е.Д (от 0.4 до 5%) по абсолютной величине, а стандартное отклонение разности (разброс) от 16.9 до 26.4 е.Д. (от 5.4 до 7.9%). Сопоставления с данными озонометрической сети показали, что средние разности между спутниковыми и наземными данными составили 5.1 е.Д. (1.4%), а стандартное отклонение разностей 34.9 е.Д (9.6%). При этом для различных станций озонозондирования эти величины существенно различаются.

Тимофеев и др. Сравнение спутниковых измерений ОСО МСУ-ГС с наземными и спутниковыми измерениями (Bruker 125HR, TROPOMI, ИКФС-2). Метеорология и гидрология, в печати. 2025.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 124032000025-1

Исследование динамики концентрации метана по различным продуктам данных спектрометра TROPOMI на высоких широтах

Вадим Стародубцев¹

¹ Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

starodubjr@ikfia.ysn.ru

Для исследования пространственно-временных вариаций распределения атмосферного метана по данным спектрометра TROPOMI за период 2018-2024 гг. (май-сентябрь) в работе были выбраны территории Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока (52° - 85° с.ш. 60° - 170° в.д.). Для анализа качества данных построена карта плотности покрытия снимками по продуктам RemoTeC и WFMD спектрометра TROPOMI. Также построены карты распределения усреднённых значений концентрации метана для 3 продуктов спектрометра TROPOMI. По результатам проведенного анализа за исследуемый период 2018-2024 гг. выявлена тенденция к росту концентрации метана по всем 3 продуктам данных TROPOMI. По построенным картам распределения усреднённых значений концентрации метана проведен анализ, выделены несколько зон “артефактов данных”.

Методика определения элементов вертикального распределения озона в атмосфере по данным измерений ИКФС-2

Светлана В. Акишина¹ , Александр В. Поляков¹ , Яна А. Виролайнен¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

s.akishina@spbu.ru

Озон имеет ключевое значение для химического и теплового баланса атмосферы. В связи с разным временем жизни, механизмами образования и разрушения озона, а также различием трендов его изменчивости и роли озона в различных атмосферных слоях, важно получать информацию не только об общем содержании озона, но и о его пространственном (вертикальном и горизонтальном) и временном распределении. Для получения информации о вертикальном распределении озона может быть использован метод уходящего теплового излучения. В состав оборудования российских метеорологических спутников серии "Метеор-М" №2 входит гиперспектральный ИК-зондировщик ИКФС-2, который измеряет уходящее ИК тепловое излучения в диапазоне 660-2000 см⁻¹. Оценки информативности измерений ИКФС-2 показали, что среднее число степеней свободы сигнала (DOFS) относительно вертикального профиля озона зависит от широты/сезона и в среднем близко к 4.

Представлен алгоритм решения обратной задачи с использованием физико-математического подхода, реализованного на основе метода статистической регуляризации. Для учета неопределенностей, вносимых погрешностями параметров прямой задачи (профиль температуры и водяного пара, температура поверхности и др.) и подбора оптимального алгоритма решения обратной задачи восстановления профилей озона проведены замкнутые численные эксперименты. В среднем по всем широтам оценка погрешности алгоритма в отношении общего содержания озона составляет 2.3 %. Измерения общего содержания озона в средних широтах имеют самую высокую точность (погрешность оценивается как 1.7 %). В будущем предстоит учесть неопределенность в отношении излучательной способности поверхности.

Численные эксперименты показали, что в тропосфере средняя погрешность определения содержания озона по данным измерений ИКФС-2 без учета погрешности сглаживания составляет 5-10 % в зависимости от широты (наименьшая погрешность наблюдается в высоких широтах). Погрешность определения содержания стратосферного озона составляет 5-15 % (наименьшая погрешность наблюдается в низких широтах). Максимальная погрешность относительно профиля озона наблюдается области верхней тропосферы/нижней стратосферы (UTLS-область) и составляет 20-30 %.

Проведена обработка реальных измерений ИКФС-2. Результаты проверены с вертикальными профилями озонозондирования атмосферы. Средние разности показывают, что в алгоритм ИКФС-2 переоценивает содержание озона на 10-25 % в UTLS-области, в то время как в стратосфере недооценивает содержание озона на ~ 5-10 % по сравнению с данными измерений озонозондов.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, номер проекта 124032000025-1.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 124032000025-1

Метод главных компонент в задаче сжатия измерений спутниковых гиперспектральных ИК-зондировщиков

Леонид А. Леусенко¹, Александр Б. Успенский¹, Дмитрий А. Козлов²

¹ Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"

² Государственный научный центр Российской Федерации - "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша"

leon.leusenko@yandex.ru

Рассматривается применение алгоритма метода главных компонент (МГК) в задаче сжатия спектров уходящего теплового ИК-излучения - измерений гиперспектрального ИК-зондировщика ИКФС-ГС, планируемого к установке на перспективных геостационарных метеоспутниках серии «Электро-М».

Объем данных ИКФС-ГС за один час съемки будет составлять примерно 14,4 Гбайт с учетом следующих проектных характеристик аппаратуры: регистрация спектров в 2-х диапазонах ($680 - 1210 \text{ см}^{-1}$ и $1600 - 2250 \text{ см}^{-1}$), спектральное разрешение $0,625 \text{ см}^{-1}$, область съемки $640 \times 640 \text{ км}^2$, пространственное разрешение 4 км в надире, около 6,5 млн спектров по 1888 отсчетов, 10 бит на один спектральный отсчет. Вследствие большого объема необходимо сжатие спутниковой информации. Кроме того, в соответствии с рекомендациями ВМО измерения указанного состава считаются ключевыми в создаваемой Интегрированной глобальной системе наблюдений (WIGOS) и должны распространяться пользователям в терминах главных компонент (ГК).

Ввиду отсутствия фактических спутниковых измерений ИКФС-ГС и частичного подобия характеристик аппаратуры ИКФС-ГС и ИКФС-2 отработка алгоритма сжатия выполнялась на имитационных данных - измерениях ИК-спектров ИК-зондировщиками ИКФС-2 (диапазон $660 - 2000 \text{ см}^{-1}$, 2700 спектральных отсчетов), установленными на полярно-орбитальных метеоспутниках «Метеор-М» № 2 и № 2-4. Предлагаемый алгоритм реализует разложение каждого ИК-спектра по базису обобщенных эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), который формируется из «старших» собственных векторов выборочной ковариационной матрицы, построенной по результатам измерений и нормированной на ковариационную матрицу шума [1, 2].

Для численных экспериментов по сжатию сформированы различные базисы ЭОФ: по полусуточным сбросам файлов с данными ИКФС-2 за отдельные сроки 2024г.; по «годовой» выборке, включающей файлы измерений за 25 число каждого месяца 2022 г. (объем примерно 10^4 и 10^6 спектров соответственно). Алгоритм сжатия применялся к данным в трех диапазонах ($660-765$, $765-1400$ и $1400-2000 \text{ см}^{-1}$) и к полному спектру. Показано, что аппроксимация спектров с погрешностью, не превышающей инструментальный шум, достигается разложением по 20-30 (первая полоса), 30-40 (вторая и третья полосы) и 30-50 (полный спектр) ЭОФ в зависимости от сформированного ортогонального базиса. Тем самым, подтверждена эффективность созданного алгоритма сжатия - для восстановления (без заметной потери информативности) и распространения пользователям измеренных ИК-спектров достаточно определять не более 50 ГК.

1. Успенский А.Б. и др. Применение метода главных компонент для анализа ИК-спектров высокого разрешения, измеренных со спутников - Исслед. Земли из космоса, 2003. N 3, С. 26-33.
2. Козлов Д. А. и др. Оценка ковариационной матрицы шума в измерениях бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2. - Исслед. Земли из космоса, 2022, № 1, С. 53-67.

Об определении распределения источников двуокиси азота в тропосфере по высокодетальным измерениям ГСА/Ресурс-П №2

Олег В. Постыляков¹, Анастасия С. Христова^{1,2}, Алексей И. Чуличков^{2,1}, Александр Н. Боровский¹, Юлия С. Мухартова²

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

oleg.postylyakov@gmail.com

Семейство окислов азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) играет главную роль в разрушении озона в стратосфере и его образовании в тропосфере. С 2013 года на солнечно-синхронной орбите работает серия спутников Ресурс-П. Гиперспектральная аппаратура (ГСА), установленная на борту Ресурс-П, регистрирует рассеянное солнечное излучение в спектральном диапазоне 430–520 нм, который используется для определения содержания в атмосфере такой примеси как диоксид азота. Мы разработали метод определения 2D поля содержания NO_2 по измерениям ГСА Ресурс-П, который позволяет получить содержание NO_2 с пространственным разрешением около 2.4 км при типичной для космических измерений точности 1.0×10^{15} молек/см² на сетке представления данных 120 м [1], что превышает пространственное разрешение других современных спутниковых инструментов. Его использование позволило в 2016 году впервые выявить точечные антропогенные источники примеси масштаба предприятия по измерениям из космоса [1]. Для интерпретации измерений разработана химико-транспортная модель с высоким пространственным разрешением [2].

В работе рассматриваются несколько методов решения обратной задачи определения распределения источников примеси по полученным высокодетальным 2D полям содержания NO_2 . На первом этапе на основе транспортно-химической модели был получен шлейф распределения NO_2 от точечного стационарного источника. Также показано, что при наблюдаемых концентрациях NO_2 концентрация в шлейфе линейно зависит от мощности выбросов NO_x . В результате принятая линейная модель формирования пространственного распределения NO_2 в зависимости от пространственного распределения источников.

Первый построенный метод для оценивания распределения источников является линейной оценкой минимальной дисперсии с ограничением на операторную невязку. В рассматриваемом нами случае алгоритм может быть реализован с использованием быстрого преобразования Фурье, которое преобразует модель прямой задачи в задачу с диагональной матрицей, что существенно ускоряет вычисления.

Второй рассмотренный нами метод – оценка квадратичного программирования с ограничением на восстанавливаемый сигнал в виде его положительности. Получаемый алгоритм является нелинейным. Для вычисления данной оценки используется алгоритм проекции градиента.

Показано видимое значительно более высокое качество восстановления распределения источников при использовании второго подхода.

Работа выполнена за счет средств государственных заданий ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер темы 125020501413-6, и МГУ им. А.М. Ломоносова.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Государственное задание ИФА им. А.М. Обухова РАН", грант 125020501413-6
2. "Государственное задание МГУ им. А.М. Ломоносова", грант без номера

Исследование пространственно-временной изменчивости общего и тропосферного содержания озона по данным спутниковых измерений ИКФС-2

Яна Виролайнен¹, Александр Поляков¹, Георгий Неробелов¹, Дмитрий Козлов², Юрий Тимофеев¹, Светлана Акишина¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Государственный научный центр Российской Федерации - "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша"

yana.virolainen@spbu.ru

Озон является одним из важнейших параметров атмосферы Земли, влияющих на климат, экологию и погоду. Стратосферный озон поглощает опасное для биосферы коротковолновое УФ-излучение Солнца, тропосферный озон – парниковый газ, который в нижней тропосфере также оказывает вредное влияние на растительность и здоровье людей.

Мониторинг содержания атмосферного озона в рамках международной системы дистанционного зондирования атмосферы выполняется в настоящее время с использованием различной аппаратуры и геометрии наблюдений.

Российский прибор ИКФС-2 измеряет уходящее тепловое ИК-излучение системы Земля-атмосфера на спутниках серии «Метеор-М» №2 с 2015 г. В настоящей работе проанализированы поля распределения общего (ОСО) и тропосферного (ТрСО) содержания озона в период с 2015 по 2022 г., полученные по данным спектрометрических измерений ИКФС-2 с помощью оригинальной методики, основанной на использовании метода искусственных нейронных сетей.

Продемонстрированы возможности использования данных ИКФС-2 для анализа эволюции озонового слоя в период возникновения озоновых аномалий, в том числе, и во время «полярных ночей». Получены оценки межгодовых изменений в ОСО для различных регионов земного шара.

Получены первые оценки и проведен анализ распределения и изменения полей ТрСО как в глобальном, так и в региональном масштабах. Показано, что спутниковый прибор ИКФС-2 может быть использован для анализа пространственно-временной изменчивости ТрСО в периоды роста его содержания, вызванные, например, лесными пожарами.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 124032000025-1

Сравнение карт распределения растительности Свердловской области по базам данных MCD12C1 и VEGA-SCIENCE

Григорий А. Сухих¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

augustmiloskiy@gmail.com

Актуальность сравнения карт разных баз данных обусловлена необходимостью получения максимально точных и актуальных сведений о территории, поскольку в современном мире существует множество источников картографической информации, и различия в классификации объектов и типов растительности между базами данных могут существенно влиять на результаты исследований, при этом точность данных может варьироваться в зависимости от используемого источника и методов сбора информации. Разрешение снимков и методы обработки данных существенно влияют на детализацию карт, а актуальность информации может различаться в зависимости от частоты обновления баз данных, что имеет практическое значение для научных исследований, требующих максимально точных данных для корректного анализа территории, экологического мониторинга, зависящего от достоверности информации о типах растительности и изменениях в экосистемах.

Методологическая ценность сравнения заключается в выявлении расхождений в классификации объектов, определении наиболее точных источников данных, создании методик объединения информации из разных баз данных. Сравнение картографических данных становится все более важным инструментом для создания комплексных цифровых карт, прогнозирования изменений в природной среде, планирования хозяйственной деятельности и решения задач городского и регионального планирования.

Продукт MCD12C1 создан на основе данных MODIS собранных в пиксель размером 0,05°x0,05° (5600м) [1]. Для создания карты VEGA использовались данные спектрорадиометра MODIS с разрешением 230м [2].

При анализе классов растительности только по их названиям возникают значительные расхождения в оценке площадей. Однако, если объединить типы в основные классы, можно выявить схожие закономерности в распределении площадей [3].

Так же объединение площадей типов растительности карты Vega обусловлено критериями классов MCD из руководства по эксплуатации MCD12Q1 Version 6, заключающихся в разреженности растительности разной высоты [4]. В результате проведенного сравнения показано, что карты растительности Свердловской области, полученные из данных продукта Vega-Science и продукта MCD12C1 совпадают с точностью до нескольких процентов. Площадь древесной растительности отличается на 1,37%, кустарников на 6,76%, травянистой растительности на 0,25%, пашни – 0,12% и водные объекты на 3,73%.

Список использованной литературы

1. URL: <http://iki-z.ru/default.aspx?id=3> (дата обращения: 02.03.25).
2. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12c1v006/> (дата обращения: 02.03.25).
3. Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, А. В. Губаев, С. А. Лежнин, Ю. А. Полевщикова Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 36-48.
4. User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2016t1/36-48.pdf (дата обращения: 02.03.25).

Сравнение данных о грозах спутникового детектора молний Lightning Imager и грозопеленгационной системы НИЦ «Планета» на европейской территории России.

Илона Д. Горлова¹, Анастасия П. Влас¹

¹ ФГБУ Центр Космической Гидрометеорологии «НИЦ «Планета», Россия

ilonagorlova@gmail.com

Грозовая активность в кучево-дождевой облачности часто сопровождает неблагоприятные и опасные явления погоды, в связи с чем актуальной задачей является оперативный мониторинг грозовой деятельности с высокой частотой обновления информации и пространственной детализацией.

В ФГБЦ «НИЦ «Планета» эксплуатируется грозопеленгационная система (ГПС) из 8 грозопеленгационных датчиков Vaisala, расположенных в Центральном и Южном федеральных округах. Совместно с аналогичной системой из 6 датчиков Vaisala, эксплуатируемых ФГБУ «ВГИ» на Северном Кавказе [1], осуществляется непрерывный мониторинг грозовой активности на значительной части европейской территории России. С помощью датчиков Vaisala измеряется направление на электромагнитный сигнал от разряда молнии и регистрируется время его прибытия в низкочастотном диапазоне спектра (1-350 кГц). После обработки данных ГПС НИЦ «Планета» предоставляет информацию о времени, местоположении и токовых характеристиках разрядов и вспышек молний типа облако-облако или облако-земля.

Альтернативой наземным ГПС является мониторинг грозовой активности с помощью детекторов молний, установленных на геостационарных спутниках серии GOES (аппаратура GLM), FY-4 (аппаратура LMI), MTG (аппаратура LI). Спутниковый детектор молний Lightning Imager (LI) установлен на космическом аппарате Meteosat-12 (точка стояния 0.3°) и фиксирует оптические импульсы от молний всех типов на верхней границе облаков на длине волны 777.4 нм с разрешением 4,5 км в подспутниковой точке и длительностью кадра 1 мс [2]. Зона охвата LI составляет более 80 % видимого диска и включает территорию Европы, в том числе европейскую территорию России. Выходные данные LI доступны пользователям в двух основных видах – группы и вспышки молний – а также в виде вторичных данных, приведенных к сетке сканирующего радиометра FCI (входит в полезную нагрузку этого же спутника) и накопленных за 30 с. Группы молний по данным LI представляют собой объединения соседних (по стороне или диагонали) пикселей с зафиксированными оптическими импульсами от молний в течение одного кадра, что представляет собой аналог разрядов молний, обнаруживаемых наземными системами. Вспышки молний по данным LI – это объединенные по пространственно-временному признаку группы [2].

В работе рассмотрены зарегистрированные случаи гроз на европейской территории России за март-май 2025 г. Показано, что зоны гроз, определяемые по данным детектора молний LI/Meteosat-12 и наземной ГПС НИЦ «Планета», имеют достаточно хорошее соответствие друг с другом, однако спутниковый детектор чаще фиксирует большее количество вспышек молний. Возможно, это связано с тем, что спутниковый прибор фиксирует больше облачных вспышек молний, которые составляют, в среднем, $\frac{3}{4}$ от общего количества молний, в то время как наземная ГПС НИЦ «Планета» с большей вероятностью регистрирует вспышки типа облако-земля (до 95 % в центре сети), чем типа облако-облако (до 70 % в центре сети). Отмечено также, что вспышки молний по данным спутникового детектора LI смешены по сравнению с данными ГПС НИЦ «Планета» в восточном направлении на расстояние около 10-20 км, что, вероятно, связано с худшим пространственным разрешением спутникового прибора на краю зоны обзора и ошибками параллакса.

Список литературы:

1. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе. Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 2-11.
2. MTG LI level 2 data guide. <https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/mtg-li-level-2-data-guide>

Временные тренды и эмиссии содержания CO₂ российских городов по данным спутниковых измерений OCO-2

Григорий Кобзарь¹, Георгий М. Неробелов², Юрий М. Тимофеев²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Санкт-Петербургский Государственный Университет

kobzargv@mail.ru

Рост содержания парниковых газов в земной атмосфере приводит к нарушениям радиационного баланса и изменениям климата планеты. Значительный вклад в эмиссии важнейшего парникового газа CO₂ вносят города, вклад которых оценивается ~70%. Несмотря на принимаемые меры по сокращению антропогенных эмиссий CO₂ в различных странах рост эмиссий продолжается. С 1990 года глобальные выбросы CO₂ увеличились более чем на 60 процентов. В последние десятилетия для мониторинга общего содержания CO₂ и его антропогенной эмиссии активно используются спутниковые дистанционные измерения. Спутниковые измерения и определения содержания CO₂ осуществляются уже длительный период с помощью аппаратуры GOSAT, OCO-2 и -3. Измерения OCO-2 продолжаются уже более 10 лет. В работе приведены примеры анализа измерений XCO₂ спутником OCO-2 с целью изучение пространственно-временного распределения содержания CO₂ в окрестностях промышленных городов России (17 городов). Сезонный ход XCO₂ в районе исследуемых городов характерен максимумом в конце зимы-начале весны и минимумом в конце лета, что соответствует сезонному изменению содержания CO₂ и в других частях планеты. Диапазон межгодовых трендов XCO₂ по данным измерений OCO-2, например, в городах Челябинск, Новосибирск и Екатеринбург составляет 1,9-2,7 ppm/год, Оценка эмиссии CO₂ с территории г. Челябинска за 5 июня 2019 г. при помощи измерений OCO-2 составляет 16 Mt g⁻¹ с территории вероятного источника или ~0,9 Mt g⁻¹km⁻². Анализ антропогенной эмиссии CO₂ на основе инвентаризационных баз данных EDGAR (англ. The Emissions Database for Global Atmospheric Research) v8.0 за 2019 г. показал заметно меньшее значение - что удельная эмиссия газа на территории города составляет ~0,5 Mt g⁻¹km⁻².

Исследование проведено при поддержке:

1. "СПбГУ", грант шифр проекта 116234986

Постерная сессия

Характеристики соответствия измерений АОТ орбитального прибора MODIS/Terra и сети AERONET в зависимости от облачных параметров

Андрей Е. Белов^{1,2}, Наталья В. Панкратова¹, Вадим С. Ракитин¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

y.beloff2013@yandex.ru

Мы проанализировали данные измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) на длине волны 550 нанометров, полученные с орбитального спектрометра MODIS, установленного на спутнике Терра, из 23 пунктов наземной сети спектрофотометров AERONET, отличающихся по уровню аэрозольной нагрузки и расположенных в разных районах Европы, Азии и Африки и в разных физико-географических зонах. Выполнено сопоставление измерений MODIS/Terra (col. 6.1, уровень 3, переменная AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined_Mean, разрешение 1x1 градус) с среднесуточными данными АОТ сети AERONET (уровень данных 1.5); при этом наземные измерения рассматривались в качестве эталонных), рассчитаны параметры корреляции наземных и спутниковых данных в зависимости от параметров облачности (переменная Cloud_Fraction_Day_Mean, далее CFDM), определяемых по измерениям MODIS. Для большинства станций установлено, что при уменьшении параметра облачности, характеристики соответствия облачных и наземных данных улучшаются.

В работе мы использовали фильтрацию данных MODIS по переменной Cloud_Fraction_Day_Mean с шагом 0.1 в пределах от 1.0 (нефильтрованные данные) до 0.1 для исследования влияния параметров облачности на характеристики соответствия спутниковых и наземных данных (коэффициент корреляции, коэффициент наклона и свободный член линейной регрессии).

На большинстве пунктов, расположенных в континентальных районах умеренного пояса (10 из 13) установлено существенное увеличение коэффициента корреляции (R) при уменьшении балла облачности (в среднем для 10 станций R увеличился с 0.79 (для нефильтрованных данных, CFDM \leq 1.0) до 0.84 для CFDM \leq 0.5 и 0.88 (для CFDM \leq 0.2). На 3-х оставшихся улучшение упомянутого параметра менее выражено. На 1-й из 4-х станций, расположенных в прибрежных зонах тропического и субтропического пояса, аналогичный эффект увеличения корреляционного коэффициента выражен явно, на остальных трёх – менее заметно. Среди станций, расположенных в пустыне, описанный эффект хорошо выражен на 1-й из 7-и станций, ещё на одной он выражен слабо, на остальных 5-и пустынных станциях аналогичный эффект не отмечается. Эффект улучшения прочих параметров соответствия (коэффициент наклона и свободный член линейной регрессии) в основном для станций, расположенных в континентальных районах умеренного пояса; на тропических прибрежных и пустынных станций эффекта улучшения данных параметров не отмечено (значения k и a флюктуируют в диапазоне одних и тех же значений).

Для улучшения качества данных MODIS (по АОТ) над континентальными районами предлагается фильтрация по облачности CFDM \leq 0.5, увеличивающая репрезентативность измерений 3-го уровня, и при этом незначительно уменьшающая количество экспериментальной информации (до 70-80% от общего количества нефильтрованных данных).

Сравнение мониторинга гроз по спутниковым, наземным метеорологическим и грозопеленгационным наблюдениям для Европейской территории России

Елена В. Волкова¹, Анастасия П. Влас¹

¹ ФГБУ Центр Космической Гидрометеорологии "НИЦ "Планета", Россия

quantocosa@bk.ru

Грозы – опасное явление погоды, так как удары молний могут вызывать пожары, повреждения линий электропередач, а сопровождающий их сильный ливень приводит к наводнениям, размытию дорог, сходу селей и др. Наземные наблюдения за погодой регистрируют грозу на метеостанции и в окрестностях с периодичностью 3 ч и временным лагом до нескольких часов, а также субъективны (наблюдатель может слышать грозу на расстоянии до 20-30 км и не расслышать единичный разряд над станцией, также существует проблема помешания наблюдения в коды погоды «в срок», «в последний час» и «между сроками»). Грозопеленгационные датчики объединённой грозопеленгационной системы (ГПС) НИЦ «Планета» и Высокогорного геофизического института регистрируют электрические разряды в облаке непрерывно на расстоянии до 750 км и имеют точность местоопределения молний в центре сети до 250 м (вероятность обнаружения до 80 %), однако на краю обзора ошибки местоопределения растут до 10-20 км, а вероятность обнаружения молний падает до 20-30 %. Спутниковые наблюдения с помощью многоканальных радиометров-имаджеров имеют большую площадь покрытия, высокую периодичность (до 15 мин) и малый лаг (несколько минут), однако детектируют грозовые облака по косвенным признакам, а при больших углах визирования могут терять небольшие по площади и интенсивности грозы или смещать локацию облака (до 20-40 км).

В ЕЦ НИЦ «Планета» разработана методика обнаружения зон гроз по спутниковым измерениям радиационной температуры в разных спектральных каналах методом порогового дешифрирования по косвенным признакам. Выделяется 4 класса гроз в зависимости от интенсивности и вероятности события. В 2021 г. запущен российский высокоэллиптический гидрометеорологический космический аппарат (КА) «Арктика-М» №1, а в феврале 2024 г. – КА «Арктика-М» №2. Методика детектирования гроз была адаптирована к данным прибора МСУ-ГС-ВЭ (многозональное сканирующее устройство – геостационарное, модернизированное для высокоэллиптических орбит) КА серии «Арктика-М». В пределах Европейской территории России (ЕТР) расположено 14 грозопеленгационных датчиков в составе ГПС и несколько десятков метеостанций, ведущих наблюдение за погодой.

Проведено сравнение 3х способов мониторинга гроз. В целом, наименее удобными для мониторинга грозовых облаков являются наземные наблюдения на метеостанциях за погодой из-за их субъективности, точечности, невозможности точно определить время грозы (отклонение от указанного срока до 3х часов) и большого временного лага. В результате, как спутниковые, так и грозопеленгационные наблюдения при сравнении с ними дают самые низкие оценки точности. При сравнении спутниковых наблюдений с грозопеленгационными совпадение намного выше. Спутниковые наблюдения несколько завышают зоны слабых гроз, показывая облака, способные переродиться в грозовые, или, наоборот, распадающиеся, а ГПС не даёт полного представления о синоптической обстановке в регионе (внутримассовая гроза или фронтальная).

Поэтому для наиболее полного мониторинга гроз следует комбинировать разные виды наблюдений, чтобы они дополняли друг друга. Из-за большой периодичности и задержки по времени относительно срока спутниковой съёмки наземные метеонаблюдения могут использоваться только для анализа ситуаций «задним числом». При оперативном мониторинге гроз оптимально накладывать наблюдения ГПС на результаты спутниковой классификации – пользователь видит ситуацию у себя на экране через ~20 мин от указанного срока с периодичностью обновления информации 15 мин.

**СЕКЦИЯ 2. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ в РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА**

Председатель: д.ф.-м.н. **Тимофеев Ю.М.** (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. **Фейгин А.М.** (ИПФ, Нижний Новгород, Россия), к.ф.-м.н.

Виролайнен Я.А. (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия), д.ф.-м.н. **Щукин Г.Г.** (Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия)

Устные доклады

Предсказание вертикального профиля оптической турбулентности по ассимилированным метеорологическим характеристикам и данным оптических измерений с использованием Машинного Обучения

Максим Б. Дрига¹, Артем Ю. Шиховцев¹, Павел Г. Ковадло¹, Евгений А. Копылов², Сергей А. Потанин^{2,3,4}, Борис С. Сафонов⁴

¹ Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

² Институт астрономии Российской академии наук

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

⁴ Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга, Россия

driga@iszf.irk.ru

Введение

Оптические неоднородности атмосферы ограничивают разрешающую способность наземных телескопов. Для улучшения качества наблюдений необходимо знание высотного распределения структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха $Cn2$. В данной работе мы апробировали методы машинного обучения[1] с целью предсказания высотного профиля $Cn2$.

Методология

Для подготовки обучающего набора данных использовались данные реанализа атмосферы ERA-5 и метеорологические характеристики, полученные в приземном слое. Эти данные были скомбинированы с архивными оптическими наблюдениями $Cn2$ на Кавказской астрономической обсерватории ГАИШ МГУ.

Данные ERA-5 имеют ежечасное разрешение и получены в результате ассимиляции измерений атмосферных характеристик. Входными параметрами для обучения модели стали: высота пограничного слоя, турбулентные приповерхностные напряжения, напряжения от гравитационных волн и средняя скорость порывов ветра[2].

Метеорологические характеристики включали температуру воздуха, скорость и направление приземного ветра, а также влажность. Оптические измерения проводились с помощью телескопа, используя методику MASS-DIMM[3].

Данные и результаты

Измеренные значения $Cn2$ были доступны для высот: 0, 0.5, 0.71, 1, 1.41, 2, 2.82, 4, 5.66, 8, 11.3, 16, 22.6 км. Архивы данных охватывают период с 15 ноября 2007 года по 16 июня 2013 года. Для обучения использовались десятичные логарифмы $lgCn2$.

В результате исследования была получена оптимальная конфигурация модели "Случайный Лес", связывающая вертикальные профили атмосферной оптической турбулентности с данными реанализа ERA-5. Метод "Случайного Леса" показал наилучшие результаты: коэффициент корреляции между измеренными и предсказанными значениями $Cn2$ составил около 0.78.

Для высоты 0.71 км средние абсолютные и квадратические отклонения между измеренными и предсказанными значениями $lg(Cn2)$ составили около 0.44 и 0.32 соответственно. Для высоты 22.6 км эти значения составили 0.13 и 0.03.

Выводы

Наиболее важными входными характеристиками для моделирования вертикальных профилей АОТ являются данные реанализа ERA-5, включая составляющие скорости ветра и температуру воздуха. Это позволяет предположить, что вертикальные профили АОТ могут быть определены с использованием машинного обучения для других астрономических обсерваторий.

По нашим оценкам, использование локальных приземных данных улучшает качество воспроизведения вариаций C_n^2 на 5-8%.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00041. Измерения и первичная обработка данных осуществлены при поддержке Минобрнауки России.

Список источников

1. Shikhovtsev, A.Y. et al. Estimation of Astronomical Seeing with Neural Networks at the Maidanak Observatory. *Atmosphere* 2024, 15, 38. <https://doi.org/10.3390/atmos15010038>
2. Shikhovtsev, A.Y.; Kovadlo, P.G. Atmospheric Boundary Layer and Free Atmosphere: Dynamics, Physical Processes, and Measuring Methods. *Atmosphere* 2023, 14, 328. <https://doi.org/10.3390/atmos14020328>
3. Shikhovtsev, A.Y. et al. Vertical Distribution of Optical Turbulence at the Peak Terskol Observatory and Mount Kurapdag. *Remote Sens.* 2024, 16, 2102. <https://doi.org/10.3390/rs16122102>

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский Научный Фонд", грант 23-72-00041

Пространственные распределения аэрозоля на высотах полетов гражданской авиации по данным проекта DELICAT

Алексей Е. Мамонтов¹, Ольга В. Федорова¹, Михаил Е. Горбунов¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

alex1372049@gmail.com

В 2009–2015, как часть 7-ой Рамочной программы Евросоюза по научным исследованиям и технологическому развитию выполнялся проект DELICAT (DEmonstration of Lidar based Clear Air Turbulence detection, Демонстрация обнаружения турбулентности ясного неба при помощи лидара) с участием ИФА им А.М. Обухова РАН. В ходе проекта был разработан и изготовлен самолетный ультрафиолетовый лидар для заблаговременного обнаружения турбулентности ясного неба (ТЯН) впереди по курсу по сигналу обратного рассеяния. Наблюдение рассеянного назад излучения проводилось на двух поляризациях, с целью выделения флюктуаций сигналов от аэрозоля, который может приводить к деполяризации. В период 17.07–12.08.2013 года были проведены 11 полетов общей длительностью 33 ч. для испытания лидара. Полеты происходили над Западной Европой, Британскими островами и прилегающими морскими территориями в условиях ясной погоды. Скопления аэрозоля и/или ТЯН были зарегистрированы в каждом полете. В результате был получен уникальных массив наблюдений.

Аэрозоль выступает в 2-х ролях:

- 1) он является помехой, вносящей искажения в сведения о возможных областях ТЯН,
- 2) он является объектом изучения, в частности, исследования размеров и пространственно-временной эволюции его скоплений.

В данной работе был проведен анализ пространственных спектров флюктуаций плотности аэрозоля. Для этого выбирались отрезки полета с постоянными высотой, направлением и скоростью самолета. Многочасовая запись интенсивности рассеянного излучения разбивалась на отрезки длительностью 1 минута. За это время самолет смещался на 7–11 км вдоль трассы полета. Сигнал рассматривается в двух координатах: расстояние от самолета до рассеивающего объема и путь самолета относительно воздушной массы. Был предложен новый метод обработки сигнала, основанный на 2-мерном преобразовании Фурье, позволяющий идентифицировать облака аэрозоля. При этом делаются следующие приближения: 1) облака на масштабе времени порядка 1 минуты неподвижны, 2) вариации направления линии зондирования малы. Во введенных выше координатах облака аэрозоля проявляются в виде полос, наклоненных под углом 45 градусов. Вычислялись двумерные Фурье-спектры сигнала для выбранных зон полетов: а) без аэрозоля, что позволяет оценить уровень шумов; б) с облаками аэрозоля. Для зон, где наблюдается аэрозоль, спектральная плотность имеет острый пик в окрестности главной диагонали частотной плоскости. Полезный сигнал в указанных координатах представляет собой плоскую волну в направлении диагонали, и, следовательно, Фурье-разложение такого сигнала будет содержать только гармонические волны вдоль диагонали. Диагональные сечения полученных 2-мерных спектров равны одномерным пространственным спектрам флюктуаций аэрозоля. Одномерные спектры ко-поляризованного сигнала и кросс-поляризованного сигнала подчиняются степенному закону с наклоном от -2 до -2.5. Во флюктуациях наблюдаемого сигнала превалируют эффекты аэрозоля.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН", грант FMWR-2025-0002

Оптико-информационное обеспечение обнаружения артефактов на сложном фоне роботизированным комплексом с элементами нейронных сетей

Игорь В. Якименко¹, Юрий И. Якименко¹, Поляков В. Роман¹, Лавринков Н. Николай¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

jakigor@rambler.ru

Под артефактом следует рассматривать беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Крупногабаритные БПЛА самолетного типа по своим демаскирующим характеристикам сопоставимы с традиционными аэродинамическими целями. В условиях ограниченной эффективности радиолокационных методов перспективным направлением является использование роботизированных средств оптико-электронной разведки (ОЭР). Наиболее перспективны средства ОЭР работающие в инфракрасном (ИК) диапазоне, так как способны работать круглосуточно.

В связи с этим разработана нейросетевая модель на основе архитектуры YOLOv11, способная автоматически детектировать и классифицировать БПЛА роторного и самолётного типов, а также птиц в ИК-спектре. Для обучения использован расширенный набор данных, включающий как открытые данные, так и собственные видеозаписи, полученные с тепловизионной камеры mIR-1280C12S на равномерном и сложном фоне (под сложным фоном следует понимать излучение неоднородностей АФ, облачность с разрывами), а также в различных погодных условиях и дистанциях.

Обученная модель демонстрирует среднюю точность 82,7% при полноте 82%, успешно идентифицируя БПЛА роторного и самолетного типов, а также птиц. Однако эффективность обнаружения объектов субпиксельного размера (<50 пикселей) остаётся ограниченной, особенно на сложном (неоднородном) АФ, который сформирован облачностью различных классов с наличием разрывов и (или) значительного градиента водности с малыми угловыми величинами.

Для повышения точности детекции малогабаритных целей исследовано применение метода SAHI (Slicing Aided Hyper Inference), обеспечивающего анализ видеопотока путём сегментации кадров (разделение видеокадров на сегменты).

Для выбора оптимального размера сегмента были проведены экспериментальные исследования пространственных структур излучения облачности в ИК-диапазоне. На основе полученного статистического материала о пространственных спектрах неоднородностей АФ установлено, что характерным отличием пространственной структуры излучения различных классов и баллов облачности являются угловые размеры излучающих неоднородностей в вертикальном и горизонтальном направлениях, которые определялись по значениям взаимной корреляционной функции превышающих величину 0,5 – радиус корреляции.

Замечательным свойством выявленных закономерностей является то, что найденные радиусы корреляции – это угловые интервалы, в пределах которого коэффициенты взаимной корреляции значимы, т.е. обнаруживается область пространства, в пределах которого пространственная структура излучения неоднородностей АФ по углу места и азимуту не подвержена резким изменениям, т.е. носит равномерный характер.

Для оценки эффективности предложенного метода использовалась тепловизионная видеозапись, регистрирующая траекторию БПЛА, который перемещался на постоянной высоте 500 м с равномерной скоростью, сокращая дистанцию с 3400 м до 1200 м относительно точки наблюдения.

Исходя из проведённого исследования, размер сегмента на видеозаписи был выбран равным 512 пикселям, размер перекрытия между соседними сегментами 10% от размера сегмента.

В результате, было установлено, что сегментная обработка с выбранными параметрами увеличила вероятность обнаружения на 25-30% по сравнению с традиционным покадровым методом. Особенно сильно это проявилось на дистанциях выше 2500 метров, где эффективность обнаружения сегментного подхода достигла 70-80%, тогда как при использовании стандартных покадровых подходов этот показатель не

превышал 30%.

Исследование влияния спектральных параметров зондирования при исследовании океана с учетом взволнованной поверхности с использованием метода Монте-Карло.

Ольга С. Ухинова^{1,2}

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

olsu@osmf.ssc.ru

В данной работе проведены исследования зависимости результатов зондирования от спектра излучения лазерного источника. Рассматривается задача по оценке функции распределения по времени интенсивности лазерного излучения, поступающего в приемник после прохождения через систему сред «океан-атмосфера» из заданного источника с учетом взволнованной поверхности. В данной работе рассмотрен алгоритм методов Монте-Карло предназначенный для решения задач лазерного зондирования природных сред имеющую случайную границу раздела. В данном случае таковой является поверхность морского волнения при зондировании системы сред «океан-атмосфера».

Рассматриваемые задачи лазерного зондирования отличаются от многих других задач атмосферной оптики наличием сложных граничных условий, связанных с конечными размерами исходного пучка излучения и малым фазовым объемом детектора, а также принципиально нестационарным характером моделируемого процесса переноса излучения. Это обстоятельство обуславливает характерные требования к технике статистического моделирования и определяет необходимость применения локальных оценок, являющихся хотя и трудоемким, но единственным возможным способом вычисления искомых характеристик излучения, регистрируемых детектором с малым фазовым объемом.

Исследования показывают, что результаты зондирования зависят от поверхности волнения, которая, в свою очередь зависит от скорости ветра. В данной работе исследовалась зависимость результатов от длины волны излучения, которая влияет на индикатрису рассеяния и, следовательно, на направление рассеянных частиц.

Рассматривается система «океан-атмосфера», в которой на высоте h находится случайная граница раздела двух сред, при взаимодействии с которой свет испытывает преломление или отражение. Эта граница представляет собой случайную поверхность, составленную из набора элементарных площадок, центры которых лежат на высоте h , а нормали к площадкам s – случайные единичные векторы с плотностью распределения $p(x)$ (для такой модели взволнованной поверхности в соответствующей литературе утверждено название «фацетная модель»). Взаимодействие света с веществом определяется заданием коэффициентов ослабления и рассеяния, а также индикатрисы рассеяния. В данной работе как раз исследовалось влияние выбранной индикатрисы на распределение по времени интенсивности излучения фиксированного в детекторе. Также интерес представлял вопрос величины влияния скорости ветра на распределение интенсивности излучения при конкретной длине волны.

Результаты моделирования показали, что скорость ветра одинаково сильно влияет на результат вне зависимости от индикатрисы. Представлены графики зависимости для разных скоростей ветра. Кроме того, само распределение интенсивности по времени также слабо зависит от индикатрисы. Представлены графики зависимости распределения интенсивности при различных длинах волн для разных скоростей ветра, для синего, зеленого, фиолетового областей спектра. Предпочтение, возможно, следует отдавать длинам волн с более гладкой функцией распределения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект FWNM-2025-0002).

Исследование взаимосвязи лесных пожаров и гроз в Сибири по данным дистанционных наблюдений

Олег А. Томшин¹, Владимир С. Соловьев¹, Лена Д. Тарабукина¹

¹ Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

tomshinoa@gmail.com

Природные пожары играют важную роль в глобальном углеродном цикле. Наблюдаемое в последние десятилетия потепление климата ведёт к нарушению естественной частоты природных пожаров. Одним из основных источников возгорания на обширных, труднодоступных территориях Сибири являются грозовые разряды. Ожидается, что потепление климата может привести к росту грозовой активности на высоких широтах северного полушария. Понимание взаимосвязей между грозовой активностью, метеорологическими условиями и природными пожарами является актуальной задачей в условиях меняющегося климата. В работе проведён предварительный анализ метеоусловий во время возникновения природных пожаров от гроз в Сибири по данным дистанционного зондирования и реанализа ERA5-Land. Наибольшее количество начальных точек возгораний природных пожаров, ассоциированных с грозовыми разрядами за рассматриваемый период (2009-2024 гг.), наблюдается в центре и на востоке Сибири. Метеоусловия в день регистрации возгораний отличаются для пожаров, возникших в день удара молнии и для пожаров, возникших с задержкой в 1-5 дней после удара молнии. Среднее количество осадков в день удара молнии для пожаров, возникших сразу составило 0,35 мм/день, в то время как для пожаров, возникших с задержкой – 0,52 мм/день. Средние значения дефицита давления насыщенного пара составили 1,17 гПа для пожаров, возникших сразу, и 1,01 гПа для пожаров, возникших с задержкой. Значения приземной температуры воздуха для возникших сразу пожаров в среднем составили 21,5 °C, для пожаров, возникших с задержкой, 20,7 °C.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Министерство науки и высшего образования РФ и Сибирское отделение РАН", грант 122011700172-2
2. "Министерство науки и высшего образования РФ и Сибирское отделение РАН", грант 122011700182-1

О значимости пространственных и спектральных признаков в задаче распознавания облаков на спутниковых изображениях

Александр С. Минкин¹

¹ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук

amink@mail.ru

Гиперспектральные изображения представляют собой наборы данных, обычно получаемых со спутников, способных фиксировать световые спектры в многочисленных узких диапазонах, что повышает информативность в сравнении со стандартными цветными изображениями. Для анализа гиперспектральных изображений, в частности, в задаче распознавания облаков, широко применяются модели на основе нейросетей и машинного обучения. Несмотря на высокую точность классификации, многие из этих моделей достаточно сложны в интерпретации. В большинстве случаев это затрудняет анализ результатов их применения, что делает актуальным создание алгоритмов отбора значимых признаков с использованием объяснимых моделей машинного обучения.

Большой объем исходных данных в гиперспектральных изображениях сочетается с корреляциями по соседним спектральным линиям, что делает необходимым проведение подбора наиболее информативных признаков. В данной работе предложен метод отбора признаков на основе алгоритма классификации в сочетании с существующей разметкой исходных спутниковых изображений, полученных с сенсора HYPERION. Оценка значимости выделенных признаков производилась с точки зрения качества распознавания облаков для выбранных категорий снимков с использованием алгоритма итерационного исключения групп признаков с высокой корреляцией. Обучение итогового классификатора проводилось по значимым спектральным каналам и производным признакам для трех типов поверхностей (океан, растительность, урбанизированная территория). Для распознавания сплошной и частичной облачности по выбранным спектральным каналам предложена модель на основе нейронной сети, работа которой проанализирована с учётом влияния пространственных признаков на результат распознавания облаков.

Восстановление параметров атмосферного аэрозоля при помощи прибора ODS (Optical Depth Sensor)

Владимир С. Хоркин¹, Анна А. Федорова¹, Юрий С. Доброленский¹, Илья А. Дзюбан¹, Никита А. Вязоветский¹, Андрей Ю. Титов¹, Олег И. Кораблев¹

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

vs_khorkin@mail.ru

Прибор ODS (Optical Depth Sensor) был разработан в ИКИ РАН для миссии ЭкзоМарс-2022. Данный прибор входил в состав метеокомплекса посадочной платформы и предназначался для длительного наблюдения за состоянием атмосферы Марса и взвешенного в ней аэрозоля. Прибор ODS позволяет определить среднесуточное значение аэрозольной оптической толщины, а также параметров распределения частиц аэрозоля по размерам. В случае марсианской атмосферы аэрозоль имеет важное значение для климата планеты - он изменяет радиационный баланс, рассеивая солнечное излучение, также частицы атмосферного аэрозоля являются ядрами конденсации, что влияет на циклы воды и CO_2 льда в атмосфере. Осаждаясь на поверхность планеты, аэрозоль меняет ее альбедо, что наибольшим образом сказывается в полярных областях Марса [Haberle R., et al, 2017]. Поэтому длительное наблюдение за состоянием марсианской атмосферы и её динамикой является актуальной и важной задачей.

В настоящее время, после отмены миссии ЭкзоМарс-2022, прибор ODS используется для проведения измерений в условиях земной атмосферы. Основным принципом работы прибора является измерение в течение дня величины прямого солнечного излучения и рассеянного атмосферой [Хоркин В.С., и др., 2023]. В работе рассмотрена конструкция и основные характеристики прибора, которые позволяются в разное время суток измерять как рассеянное атмосферой излучение, так и сумму рассеянного и прямого солнечного излучения. Среднесуточное значение аэрозольной оптической толщины t атмосферы определяется в двух спектральных каналах - синем ($\lambda = 320\text{-}500$ нм) и красном ($\lambda = 700\text{-}1050$ нм). Подробно анализируется методика обработки данных при помощи созданной модели, которая описывает свойства атмосферы в приближении псевдосферической геометрии. Расчеты величины рассеянного излучения проводились методом сферических гармоник и дискретных ординат с учетом многократного рассеяния при помощи программы Shdom [Evans, 2007]. В ходе расчетов учитывалось аэрозольное ослабление, рэлеевское рассеяние, а также газовое поглощение атмосферы. Используя перечисленные механизмы ослабления излучения в атмосфере планеты, моделировался выходной сигнал с прибора ODS для различных состояний атмосферы. Рассчитанные значения использовались для обработки результатов наземных полевых измерений, проводившихся в ИКИ РАН в 2022-2024 гг., удаленного определения положения прибора в ходе измерений, восстановления аэрозольной оптической толщины и параметров распределения аэрозоля по размерам. На данном этапе получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей, что позволяет восстановить аэрозольную оптическую толщину атмосферы t с точностью 0.05.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, аэрозоль, поглощение, рассеяние, SHDOM.

Литература:

1. Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R., The Atmosphere and Climate of Mars. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. 588 p.
2. Хоркин В. С., Федорова А. А., Доброленский Ю. С., Кораблев О.И., Вязоветский Н.А., Дзюбан И.А., Сапгир А.Г., Титов А.Ю., Толедо Д., Помро Ж.-П., Ранну П., Прибор ODS миссии «ЭкзоМарс-2022»: моделирование и наземные полевые измерения // Астрон. вестн.: Исслед. Солнечной системы. 2023. Т. 57. № 4. С. 307-318. doi: 10.31857/S0320930X23040059.
3. K.F. Evans, Journal of the Atmospheric sciences-special section, p.3854-3864, 2007, doi: 10.1175/2006JAS2047.1

Эмпирическая модель оптической толщины стратосферного аэрозоля по данным лидарных измерений в г. Обнинск с 2012 по 2023 гг

Владимир А. Коршунов¹

¹ ФГБУ НПО «Тайфун» , Россия

korshunov@gratyphoon.ru

Основным источником серы в стратосфере являются вулканические выбросы SO_2 . При извержениях взрывного типа они происходят непосредственно в стратосферу. Определенный вклад дают и другие источники антропогенного и природного происхождения, продукты которых поступают в стратосферу в результате вертикальной диффузии и тропосферно-стратосферного обмена. Конечным продуктом химической трансформации соединений серы является серная кислота, при конденсации которой в присутствии водяного пара образуется сернокислотный аэрозоль.

В НПО «Тайфун» (г . Обнинск, 55.1° с.ш., 36.6° в.д) с 2012 г. проводятся лидарные измерения стратосферного аэрозоля. Средняя оптическая толщина стратосферного аэрозоля за период с 2012 по 2023 гг. в слое от 13 до 30 км составила 0.010 . В докладе проводится сопоставление лидарных измерений оптической толщины с имеющимся в литературе данными о поступлении SO_2 (или серы) в стратосферу. Предварительный анализ показал, что наблюдается подобие временного хода среднегодовых значений $\tau_S(t_i)$ и содержания серы $F(t_i)$ в стратосферном аэрозоле, связанного с извержениями вулканов взрывного типа (t_i - номер года). Для построения модели принимается, что величина $F(t_i) = 0.46[Q_T(t_i-1) + Q_T(t_i-2)\exp(-1) + Q_T(t_i-3)\exp(-2) + \dots Q_C(t_i) + Q_C(t_i-1)\exp(-1) + Q_C(t_i-2)\exp(-2) + \dots]$, где Q_T , Q_C - тропические Q_T и среднеширотные Q_C среднегодовые эмиссии вулканов взрывного типа, взятые с временным сдвигом $\Delta=1$ для извержений тропического пояса и $\Delta=0$ для среднеширотных извержений. Данные по Q_T , Q_C взяты из работ [Carn et al., J. of Volc. and Geoth. Res., 311, 99-134; Schallock et al., Atmos. Chem. Phys., 23, 1169-1207], а также с сайта НАСА [<https://so2.gsfc.nasa.gov/measures.html>]. Далее рассмотрено уравнение линейной регрессии $\tau_S(t_i) = K_1 F(t_i) + K_2$. При этом измерения 2012-2023 гг. дополнены данными ранних измерений на Обнинской лидарной станции после извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. Средняя за 1992 г. величина τ_S составила 0.14 ± 0.01 . Для Q_T на основе имеющихся литературных данных принята величина 21300 Кт. В результате получены значения коэффициентов $K_1 = 1.38 \times 10^{-5}$ (Кт серы) $^{-1}$ и $K_2 = 0.0038$. Величина K_2 представляет собой фоновое значение τ_S над г. Обнинск, не связанное с вулканическими извержениями взрывного типа. Соответственно, для средней величины τ_S , относящейся к взрывными вулканическим извержениям, получается значение $0.01 - 0.0038 = 0.0062$.

Для интерпретации фонового значения τ_S проведен учет вклада альтернативных тропосферных источников в содержание серы в стратосферном аэрозоле, к числу которых относятся дегазирующие вулканы и иные природные и антропогенные источники. По данным [Brodowsky et al., Atm. Chem. Phys., 24, 5513-5548] ежегодный вклад этих источников в среднем за предыдущую декаду составил 156 Кт. При учете этой добавки в $F(t_i)$ коэффициент K_1 не меняется, а коэффициент K_2 уменьшается на величину $1.38 \times 10^{-5} \times 156 = 0.0022$. Величина 0.0022 относится к фоновому сернокислотному аэрозолю, не связанному с вулканическими извержениями взрывного типа. Остаточная разница $0.0038 - 0.0022 = 0.0016$ соответствует аэрозолю не сернокислотного типа, присутствующему в стратосфере. Прежде всего, это аэрозоль природных пожаров и метеорный аэрозоль. Получено удовлетворительное соответствие предложенной модели с независимыми данными, что позволяет распространить полученные оценки в целом на широтную зону 50-60° с.ш.

Результаты измерений СО в приземном слое и в толще атмосферы на ст. Обнинск в 2015 - 2024 гг.

Константин Н. Вишератин¹, Владимир П. Устинов, Арсений В. Шилкин

¹ НПО "Тайфун"

kvisher@gratypphoon.ru

Непосредственное влияние СО на парниковый эффект за счет поглощения солнечного излучения в окне прозрачности атмосферы 3-5 мкм незначительно, однако за счет реакций с радикалом гидроксила окись углерода косвенно влияет на содержание второго по эффективности парникового газа - метана. Это, а также токсичность обуславливают актуальность контроля за содержанием СО в атмосфере.

В докладе рассмотрены методика и результаты измерений СО в приземном слое и толще атмосферы над ст. Обнинск в 2015 - 2025 гг. спектроскопическим комплексом среднего разрешения MP-32. В приземном слое измерения концентрации СО проводятся в пробах воздуха в многоходовой кювете с длиной оптического пути около 30 м. Основные мешающие газы H_2O и N_2O . Концентрация СО находилась в ходе последовательной итерации - сопоставления измеренного с разрешением 0.12 см^{-1} спектра в спектральных интервалах 2164-2181 и $2144.5-2149 \text{ см}^{-1}$ и расчетов по HITRAN-2020.

Общее содержание СО в толще атмосферы определялось в спектральных интервалах 2155-2160 и 2126-2132 см^{-1} , где основными мешающими газами являются N_2O , H_2O и O_3 . Обратная задача определения СО в столбе атмосферы решалась с использованием пакета программ SFIT4.

Максимальные значения приземной концентрации, наблюдаемые на ст. Обнинск в зимний период, в течение 2015 - 2024 гг. постепенно уменьшались. Вместе с тем, минимальные величины, характерные для лета, в период 2021 - 2023 гг. выросли примерно на 20 ppb, что обусловило в целом за весь период наблюдений положительный, но незначимый тренд.

Результаты измерений прибором MP-32 сопоставлены со спутниковыми измерениями общего содержания и вертикальных профилей окиси углерода орбитальными комплексами MOPITT и AIRS. Спутниковые данные усреднялись относительно ст. Обнинск по пространству в области $34^\circ \times 38^\circ$ Е и $53^\circ \times 57^\circ$ N.

Средние приземные концентрации СО за период с 2015 по 2024 гг. по данным MP-32 и AIRS (слой 925 - 1000 гПа) равны $158 \pm 47 \text{ ppb}$ и $136 \pm 22 \text{ ppb}$.

Измерения общего содержания СО прибором MP-32 хорошо согласуются со спутниковыми данными MOPITT с $R^2=0.8$. Средние значения ОС_СО в пределах погрешности совпадают и равны $(2.1 \pm 0.2) \times 10^{18} \text{ молек/см}^2$, при этом небольшие тренды незначимы.

Тренды объемных концентраций xCO и спектральный состав колебаний по данным AIRS и MOPITT с высотой значительно меняются. На высотах 200 - 300 гПа фаза максимума годовой гармоники сдвигается с февраля-марта на август. Следует отметить значительный рост xCO на уровнях 50-300 гПа в летний период в 2021 - 2024 гг. Если для поверхностей 925 и 1000 гПа тренды AIRS отрицательны (-1.3 и -1.8 ppb/год), то на поверхностях 50 - 200 гПа тренды xCO за 2015-2024 гг. положительны (от 0.08 до 0.35 ppb/год). Смена знака тренда происходит вблизи 200 - 300 гПа.

Ключевые слова: окись углерода CO, приземные концентрации, общее содержание, высотные профили, спектральный и вейвлетный анализ, спутниковая информация

Оценка пространственного распределения потенциальных источников атмосферного аэрозоля на основе фотометрических измерений на Среднем Урале

Анна П. Лужецкая¹, Екатерина С. Наговицына^{1,2}, Василий А. Поддубный¹, Александр А. Карасев^{1,2}

¹ Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

luzhanka@mail.ru

Атмосферный аэрозоль отличается высокой временной и пространственной изменчивостью, существенно влияет на процессы образования облаков, осадков и радиационный теплообмен. Разнообразие источников аэрозолей и их негативное влияние на здоровье обусловливают необходимость детального изучения их распределения в атмосфере.

Цель настоящей работы - идентифицировать основные географические регионы-источники различных классов аэрозолей на основе спектральных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ), проводившихся на Среднем Урале в рамках глобального аэрозольного мониторинга AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

Для оценки полей источников атмосферных примесей применялся метод Л. Эшбо, который основывается на нахождении функции потенциального вклада источника (Potential Source Contribution Function, PSCF), связывающей результаты измерений с обратными траекториями воздушных потоков, что позволяет идентифицировать регионы расположения вероятных источников аэрозоля.

Географическая область делилась сеткой на ячейки с индексами (i, j) , где i и j нумеруют географические координаты – долготу и широту центра выделенной ячейки.

Функция PSCF оценивает вероятность того, что воздушные потоки, проходящие через конкретную ячейку сетки, несут определенный класс аэрозоля. PSCF для ij -й ячейки определяется как отношение числа траекторий, проходящих через эту ячейку и доставляющих в точку мониторинга определенный тип частиц (m_{ij}) к общему числу траекторий, проходящих через эту ячейку (n_{ij}).

Классификация региональных типов аэрозолей была выполнена методом k-средних на основе измерений спектральных АОТ. В качестве начальных центров кластеров задавались спектральные значения коэффициентов ослабления излучения, рассчитанные на основе данных региональной аэрозольной модели MURa и глобальной модели CALIPSO. Было выделено пять типов аэрозолей: пыль (Dust), чистый континентальный (Clean Continental), загрязнённый континентальный/дым (Polluted Continental/Smoke), загрязнённая пыль (Polluted Dust), высокие дымы (Elevated Smoke).

Были проанализированы данные о переносе воздушных масс на Среднем Урале к точке с координатами 57.038 с.ш., 59.545 в.д., полученные с использованием программного обеспечения модели Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) за период 2007-2020 гг. Для расчёта обратных траекторий использовались поля метеорологических параметров Северного полушария, полученные из архива базы данных Global Data Assimilation System (GDAS1).

Полученные результаты демонстрируют чёткую пространственную дифференциацию источников атмосферных аэрозолей для некоторых различных классов. Высокие значения PSCF (более 0.6) для аэрозолей класса высокие дымы сосредоточены в районе Западной Сибири. Это связано с периодическими интенсивными лесными пожарами, которые возникают в данном регионе. Для аэрозолей класса пыль максимальные значения PSCF превышают 0.8 и локализуются в южных регионах, включая степные районы Казахстана. Здесь основными источниками являются природные процессы – пыльные бури и эрозия почв. Для других типов аэрозолей значения PSCF ниже 0.5, что не позволяет однозначно выделить их источники как значимые.

Авторы выражают признательность: М.В. Панченко, С.М. Сакерину, С.А. Бересневу, С.Ю. Горда, Ю.И. Маркелову, B. Holben, A. Smirnov за содействие в проведении фотометрических измерений в пункте

мониторинга AERONET, расположенному на Среднем Урале.

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0004.

Совместные наблюдения вариаций параметров атмосферы интерферометром Фабри-Перо и Иркутским радаром некогерентного рассеяния

Илья К. Едемский¹, Роман В. Васильев¹, Алексей Д. Шелков¹, Максим Ф. Артамонов¹, Сергей С. Алсаткин¹, Уйгулан Н. Евсеев², Валентин П. Лебедев¹, Виктор П. Ташлыков¹, Анатолий В. Ташилин¹

¹ Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

² Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

ilya@iszf.irk.ru

Работа построена на наблюдениях, выполненных в рамках научно-образовательного интенсива Байкальской международной школы молодых ученых по фундаментальной физике в Иркутске с 5 по 10 сентября 2022 года. Участники интенсива выполняли работы на уникальных научных установках ИСЗФ СО РАН: Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) и Оптические приборы Национального гелиогеофизического комплекса Российской академии наук (НГК РАН).

На сегодня, ИРНР является единственной в России установкой, позволяющей определять параметры всей толщи ионосферы методом некогерентного рассеяния [1], в том числе восстанавливать такие параметры, как ионная и электронная температуры T_i и T_e , а также электронная концентрация N_e [2].

Аэрономические интерферометры Фабри-Перо (ИФП) входят в НГК РАН и расположены на территории Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (п. Торы, Бурятия) [3]. С их помощью проводятся наблюдения различных характеристик естественного ночного свечения атмосферы, в том числе - за свечением красной линии 630 нм, что позволяет получать данные об изменениях температуры атмосферы и скорости ветра на высоте около 260 км.

Во время ночных наблюдений в период 28 августа - 2 сентября концентрация N_e (по ИРНР) и красное свечение I630 (по ИФП) показали схожие вариации. Характер динамики профилей N_e позволяет предположить, что ночные значения N_e определяются меридиональным ветром и вертикальным переносом нейтральной компоненты. Оценку вертикального дрейфа плазмы под действием ветра в верхней атмосфере можно получить из условия стационарности плазмы под действием силы Лоренца, электрического поля и столкновений с нейтральными частицами. Такая оценка показала, что ночной вертикальный дрейф плазмы (на основе данных ИФП), хорошо коррелирует с вертикальной динамикой ионосферной плазмы (по ИРНР), увеличение интенсивности I630 происходит одновременно с ростом N_e около 15 UT, когда скорость вертикального дрейфа имеет минимальные значения. По-видимому, рост I630 происходит за счет увеличения числа возбужденных атомов кислорода из-за притока электронов сверху.

Проведенное нами численное моделирование показывает, что определяющая реакция возбуждения атомов $[O]$ ночью - это диссоциативная рекомбинация, интенсивность которой определяется N_e . Изменение числа электронов на высоте ~ 250 км, по-видимому, связано с динамикой нейтрального ветра, в том числе с интенсивностью вертикального переноса. Наблюданное явление указывает на важность корректного учета нейтрального ветра в задачах моделирования ионосферы и, по-видимому, указывает на необходимость введения использования вертикального переноса нейтральной атмосферы. Показанная связь N_e и I630 с учетом доминирующей роли единственной реакции образования возбужденных атомов кислорода (диссоциативной рекомбинации) может служить основой для калибровки оптических приборов с использованием радиофизических измерений параметров ионосферы.

1. Жеребцов Г.А., и др. // Радиотехника и электроника. 2002, т. 47, № 11, с. 1339–1345.
2. Алсаткин С.С., и др. // Солнечно-земная физика. 2015, т. 1, № 3, с. 28–36. DOI: 10.12737/11450
3. Васильев Р.В., и др. // Солнечно-земная физика. 2020, т. 6, №. 2, с. 105–122. DOI: 10.12737/szf-62202008

Исследование проведено при поддержке:

1. "Минобрнауки России", грант №075-Г3/Ц3569/278

Адаптация алгоритмов для системы распознавания облачности глубокой конвекции СМОГК с учётом данных высокоорбитальных МИСЗ «Арктика-М»

Андрей Е. Шишов¹, Горлач А. Ирина¹

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

shandruha@gmail.com

Современные климатические исследования свидетельствуют о том, что последние десятилетия стали самыми тёплыми за всю историю метеонаблюдений в Северной Евразии. Это, соответственно, ведет к повышению повторяемости и увеличению интенсивности процессов атмосферной конвекции, приводящей к формированию одно- и мульти-ячейковых кластеров опасных кучево-дождевых облаков и мезомасштабных конвективных систем (МКС). Мощные конвективные кластеры и системы вызывают экстремальные явления погоды - интенсивные грозы, ливни, крупный град, разрушительные шквалы и смерчи. Прогнозируемый рост повторяемости конвективных неблагоприятных явлений делает особенно актуальным развитие эффективных методов мониторинга облачности глубокой конвекции (ОГК) с использованием спутниковых данных для всей территории РФ, в том числе и для территорий с неплотно заселенных Сибири и Дальнего Востока, где ограниченное количество радиолокационных наблюдений и синоптических станций дополнительно снижает качество и детализацию мониторинга атмосферных процессов.

В данном исследовании показано применение интерактивной и автоматической системы мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК) на основе анализа отдельных случаев развития ОГК 2025 года на юге России. Автоматизированное распознавание контуров и траекторий смещения ОГК проводилось с помощью пороговых методов и алгоритмов машинного обучения на первом этапе по разработанным многолетним данным спутника Meteosat-10 в режиме сканирования Rapid Scan, обеспечивающем периодичность съёмки 5 и 15 минут для Европейской территории России. Измерения в инфракрасном и видимом диапазонах электромагнитного спектра (ЭМ) российских спутников «Арктика-М» №1-2 привлекались далее для оценки их сопоставимости и согласованности с данными Meteosat-10 и возможности применения для автоматического распознавания ОГК. Необходимо отметить, что данные МИСЗ «Арктика-М» №1-2 отличаются от данных европейских МИСЗ, использовавшихся на начальном этапе при разработке алгоритма автоматического распознавания ОГК в составе СМОГК. Поэтому был проведён анализ особенностей и характерных значений распределений радиационной температуры в различных диапазонах ИК для верхней границы (ВГО) ОГК по данным рассматриваемых МИСЗ. В результате предварительного анализа были получены достаточно близкие корреляции распознанных контуров ОГК (по качественной экспертной оценке). Поэтому на следующем этапе исследования появилось основание для адаптации алгоритма распознавания ОГК к каналам и особенностям информации МИСЗ «Арктика-М» №1-2.

Результаты показали хорошую согласованность в обнаружении и отслеживании эволюции ОГК (~85%) между разными спутниками системами и доплеровскими радарами ДМРЛ-С. Комплексное представление и сравнение разнотипных данных подтверждает возможность применения российских спутников «Арктика-М» №1-2 для автоматического распознавания ОГК, что особенно важно для наукастинга и мониторинга опасных явлений на широтах севернее 50 град с.ш. по территории России - то есть в регионах, для которых данные геостационарных спутников либо мало доступны, либо искажены.

Полученные результаты подчеркивают перспективность комплексного использования данных различных спутниковых систем при создании более точных методов прогнозирования опасных конвективных явлений в условиях меняющегося климата.

Развитие измерений содержания химически активных примесей в нижней тропосфере на станциях Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Александр Н. Боровский¹, Олег В. Постыляков¹, Данил Р. Шамсутдинов¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

borovski@ifaran.ru

В г. Кисловодске и на Звенигородской научной станции (ЗНС) ИФА им. А.М. Обухова РАН в дневное время проводятся измерения спектров рассеянного солнечного излучения методом MAX-DOAS (Multi-AXis Differential Optical Absorption Spectroscopy) в видимом спектральном диапазоне (410 – 490 нм). Спектры регистрируются при нескольких различных низких углах возвышения телескопа прибора над горизонтом: 1°, 2°, 3°, 5°, 10°, 20°, 30°, 40° и 90° (направление в зенит). Такая геометрия наблюдений позволяет восстановить вертикальное распределение (ВР) примесей атмосферы в нижней тропосфере.

В ИФА им. А.М. Обухова РАН реализован алгоритм решения задачи восстановления ВР NO_2 по данным измерений MAX-DOAS с использованием байесовского оценивания. Также разработан другой подход к решению этой задачи, свободный от известных недостатков байесовского подхода. Новый подход состоит в сужении класса возможных профилей на основе предположения о количестве возможных экстремумов в восстанавливаемом ВР NO_2 .

Оба алгоритма используют модель переноса излучения для расчётов коэффициентов воздушных масс, которые существенно зависят от оптических характеристик аэрозоля, наличия облачности, альбедо подстилающей поверхности. Отсутствие информации об этих параметрах вносит большой вклад в неопределенность результатов восстановления ВР. Для отработки новых алгоритмов на данных измерений в г. Кисловодске и на Звенигородской научной станции отобраны дни с благоприятными метеоусловиями. В докладе приводятся результаты восстановления вертикального профиля концентрации двуокиси азота для отобранных дней.

Работа выполнена за счет средств государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер темы 125020501413-6.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Государственное задание ИФА им. А.М. Обухова РАН", грант 125020501413-6

Сравнение наземных и спутниковых МКВ измерений вертикальных профилей содержания озона

Юлия И. Бордовская¹ , Юрий М. Тимофеев¹ , Анатолий В. Поберовский¹ , Хамуд Имхасин¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

bordovskayay@gmail.com

Наземные и спутниковые микроволновые (МКВ) приборы играют важную роль в региональном и глобальном мониторинге содержания климатически и экологически важных газов, одним из которых является озон. Как известно, озон в стратосфере поглощает вредную для живых организмов ультрафиолетовую радиацию, в то время как тропосфере озон является загрязняющим газом из-за его токсичности. Наличие вращательных линий поглощения озона в МКВ области является физической основой использования измерений спектров нисходящего и уходящего атмосферного теплового излучения для определения его содержания. Определение общего содержания и вертикальных профилей озона осуществляется с помощью наземных приборов в рамках различных международных сетей наблюдений, например, сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). В России наземные МКВ измерения озона осуществляются, например, в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) и Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород).

Для спутникового мониторинга газового состава атмосферы также широко используется МКВ область спектра. Прибор MLS (Microwave Limb Sounder), функционирующий на спутнике AURA (2004 г.), измеряет тепловое МКВ излучение горизонта планеты и позволяет определять вертикальные профили содержания озона на высотах от 10 до 50-70 км с высоким вертикальным разрешением (2,5-7 км). Многочисленные программы валидации измерений озона прибором MLS показали его высокое качество и возможности использовать для валидации других измерений в качестве вторичного эталона.

В данном докладе приведены результаты сравнений наземных (МКВ озонометр СПбГУ) и спутниковых (MLS) вертикальных профилей содержания озона, оценены величины рассогласования и среднеквадратичного отклонения измерений озонометра от MLS. Также приведены оценки тропосферного содержания озона.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986

Комплексный подход к изучению облаков верхнего яруса: поляризационный лидар, метеорологическая информация, спутниковый спектрорадиометр и машинное обучение

Илья Д. Брюханов¹, Олеся И. Кучинская¹, Игнатий В. Самохвалов¹, Константин Н. Пустовалов¹, Максим С. Пензин¹, Евгений В. Ни¹, Иван В. Животенюк¹, Антон А. Дорошкевич¹, Иван М. Акимов¹, Романов А. Денис¹

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет

plyton2121@mail.ru

Облачность оказывает важнейшее влияние на радиационный баланс Земли, регулируя поступление солнечной энергии на её поверхность. Облака верхнего яруса (ОВЯ) покрывают до 50% земной поверхности [1] и участвуют в формировании погоды и климата [2]. Они отражают солнечное излучение, охлаждая атмосферу, и усиливают парниковый эффект, задерживая инфракрасное излучение [3]. Численные модели не учитывают микроструктуру ОВЯ, снижая точность прогнозов погоды и климата. Такие облака состоят преимущественно из кристаллов льда, чьи размеры, форма и ориентация зависят от метеоусловий. Нередко частицы в ОВЯ ориентируются горизонтально. Их плоские грани зеркально отражают видимое излучение, поскольку размеры кристаллов превышают длину волн. Это вызывает аномальное рассеяние, включая обратное.

Изучение микроструктуры ОВЯ затруднено: контактные приборы нарушают ориентацию частиц, а спутниковые наблюдения не всегда фиксируют малые и динамичные структуры. Поляризационное лазерное зондирование (ПЛЗ) – эффективный дистанционный метод, позволяющий определять размеры, форму и ориентацию частиц ОВЯ. Он основан на анализе матрицы обратного рассеяния света, содержащей информацию о микроструктуре облаков [5], и реализован в высотном матричном поляризационном лидаре (ВМПЛ) [6] Томского государственного университета. В 2009–2024 гг. в 22% сеансов измерений на ВМПЛ зарегистрированные ОВЯ были зеркальными. Чаще они наблюдались с мая по сентябрь на высотах 5–11 км.

Интерпретация данных ПЛЗ требует информации о состоянии атмосферы: температура, влажность и характеристики ветра. Данные аэрологических станций России ограничены: радиозонды запускаются дважды в сутки, а расстояния между станциями нередко превышают 100 км. Дополнительные данные предоставляют атмосферные реанализы ERA5 (ECWMF) с 1940 г. с разрешением 1 час и $0,25 \times 0,25^\circ$ [6]. Реанализ MERRA-2 (NASA) охватывает период с 1980 г. и включает дополнительные параметры, например, массовую долю облачного льда и балл облачности, с шагом 1–3 ч и разрешением $0,5 \times 0,625^\circ$ [7]. Важным источником информации об ОВЯ является спутниковый спектрорадиометр MODIS, обеспечивающий глобальный мониторинг облаков, охватывая всю поверхность Земли за 1–2 дня.

Анализ данных по параметрам ОВЯ выполнен для подготовки к созданию программного продукта на основе методов машинного обучения. Входными данными будут метеорологические параметры атмосферы, на основе которых предполагается прогнозировать геометрические и оптические характеристики ОВЯ, а также оценивать их динамику и вероятность появления. Учёт пространственной неоднородности ОВЯ, включая ориентацию частиц льда, в моделях атмосферы улучшит описание радиационных процессов и повысит точность прогнозирования погоды и климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант № 24-72-10127.

1. Ali S., et al. // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22, № 12. P. 8321–8342.
2. Heymsfield A.J. // Meteor. Monogr. 2017. V. 58. P. 2.1–2.26.
3. Тарасова Т.А. // Радиационные свойства перистых облаков. М.: Наука, 1989. С. 169–176.
4. Кауль Б.В. Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. докт. физ.-мат. наук. Томск, 2004. 219 с.

5. Брюханов И.Д. и др. // Опт. атм. океана. 2024. Т. 37, № 2. С. 105-113.
6. Copernicus Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu>.
7. Tao J., et al. // The Cryosphere Discuss. 2019. V. 13. № 8. P. 2087-2110.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 24-72-10127

Поляризационные характеристики рассеянного солнечного излучения в присутствии облаков верхнего яруса: активно-пассивный метод зондирования

Илья Д. Брюханов^{1,2}, Игнатий В. Самохвалов¹, Иван В. Животенюк¹, Евгений В. Ни¹, Антон А. Дорошкевич¹, Александр П. Стыкон¹, Олег Ю. Локтюшин¹, Денис Манохин¹

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия

plyton2121@mail.ru

Доклад посвящён анализу поляризационных характеристик рассеянного солнечного излучения в зените в присутствии и отсутствии облаков верхнего яруса (ОВЯ). Основная цель – оценка возможностей пассивной поляриметрии для выявления облаков, содержащих горизонтально ориентированные кристаллы льда, обладающих зеркальными свойствами. Применён подход, основанный на сопоставлении данных активных (поляризационных лидарных) и пассивных (поляриметрических) измерений, проведённых с помощью высотного матричного поляризационного лидара (ВМПЛ) Национального исследовательского Томского государственного университета [1]. ОВЯ состоят преимущественно из кристаллов льда, чьи форма, размеры и пространственная ориентация варьируются. При определённых условиях эти частицы ориентируются горизонтально – такие облака называют зеркальными [2], поскольку частицы льда имеют плоские грани и падающее на них излучение отражается по законам Френеля. Существенное влияние на пропускание и рассеяние коротковолновой солнечной радиации, приходящей к поверхности Земли, и длинноволновой, уходящей в космос, оказывает ориентация кристаллов в ОВЯ, поэтому такие аэрозольные образования считают важным фактором климатообразования [3]. Общая теория рассеяния электромагнитных волн на ансамблях кристаллов до настоящего времени не создана, и нет полной физической модели микроструктуры кристаллических ОВЯ. Поэтому актуальна задача их выявления, а также определения и прогнозирования условий формирования таких облаков. Активные методы, такие как лидарные измерения, позволяют выявлять облака с зеркальными кристаллами по совокупности признаков: высокой степенью деполяризации обратного сигнала, характерными значениями элементов матрицы обратного рассеяния, низкой оптической толщиной и специфическим соотношением компонент сигнала. В пассивном режиме ВМПЛ измеряет вектор Стокса и степень поляризации рассеянного солнечного света в зените. Сравнение поведения этих параметров в различных условиях позволяет выявить влияние на них ОВЯ. В докладе проанализированы данные, полученные в разные дни 2025 г. В ясную погоду степень поляризации рассеянного солнечного света в зените демонстрировала плавный ход, синхронный с изменением зенитного угла Солнца. При наличии ОВЯ наблюдались отклонения от типичного суточного хода, особенно во второй половине дня. Эти аномалии совпадали по времени с появлением облачных слоёв, зафиксированных лидаром на различных высотах, что подтвердило их влияние на поляризационные характеристики солнечного излучения. Полученные экспериментальные данные показывают, что степень поляризации рассеянного солнечного света является чувствительным индикатором оптических характеристик ОВЯ. Это подтверждает потенциал использования поляриметрических методов для диагностики атмосферного состояния. Результаты подчёркивают актуальность дальнейшего изучения влияния атмосферных факторов на поляризационные параметры и необходимость совершенствования технологий пассивной поляриметрии, особенно в сочетании с активными методами зондирования атмосферы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант № 24-77-00097. 1. Брюханов И.Д. и др. // Опт. атм. океана. 2024. Т. 37, № 2. С. 105-113. 2. Platt C.M.R. // J. Appl. Meteorol. 1978. № 17. Р. 1220-1224. 3. Кондратьев К.Я. // Метеорология и гидрология. 2004. №4. С. 93-119.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 24-77-00097

Многолетняя динамика сроков схода снежного покрова в Сибири на фоне арктического усиления

Евгения Варламова¹, Владимир Соловьев¹

¹ Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

varlamova@ikfia.ysn.ru

Снежный покров является одним из наиболее чувствительных индикаторов климатических изменений. В условиях Арктического усиления потепления наблюдается сокращение продолжительности сроков залегания снежного покрова в основном за счёт его более раннего схода. Сроки схода снежного покрова, в свою очередь, оказывают заметное влияние на растительные экосистемы. В работе изложены предварительные результаты исследования многолетней (1982-2022) динамики дат схода снежного покрова в Сибири по данным глобального реанализа ERA5-Land и спутниковым данным MODIS/Terra. В условиях арктического усиления (arctic amplification), на территории Сибири, в целом, наблюдается тенденция более раннего схода снежного покрова. В среднем по Сибири этот показатель составил 11 ± 3 дней на фоне аналогичного роста весенней температуры воздуха на $3,3 \pm 0,8^{\circ}\text{C}$. Область с наиболее высоким сдвигом (на 15 ± 5 дней) сроков схода снежного покрова на более ранние даты обнаружена на севере Сибири, где также отмечается наиболее высокий рост (на $5,1 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$) весенней температуры воздуха.

Ключевые слова: снежный покров, сход снега, Арктическое усиление, Сибирь

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКР 122011700172-2).

Постерная сессия

Автоматизированный метод оценки состояния ионосферы по данным ионозондов

Оксана В. Мандрикова¹, Юрий А. Полозов¹, Богдана С. Мандрикова¹

¹ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук

up_agent@mail.ru

В работе предлагается новый автоматизированный метод оценки состояния ионосферы по данным наземного вертикального радиозондирования. Мониторинг состояния околоземного космического пространства является актуальной задачей и направлен на предотвращение негативного влияния аномальных факторов космической погоды на технические средства наземной и космической инфраструктуры [1, 2]. Данная работа продолжает исследования [3, 4] и направлена на создание автоматизированных методов анализа данных геофизического мониторинга и прогноза космической погоды. Метод построен на синтезе элементов теории статистических решений и пороговых оценок с методами вейвлет-преобразования. Метод обеспечивает контроль состояния ионосферы (в месте регистрации данных) и обнаружение ионосферных возмущений (неоднородностей). Выходными результатами работы метода являются данные о состоянии ионосферы (спокойное/возмущенное) и параметры обнаруженных ионосферных неоднородностей, в случае возмущенного состояния. Оценивается интенсивность, продолжительность и характер (положительная или отрицательная фаза) неоднородностей. Преимуществом метода, по сравнению с аналогами, являются его адаптивные свойства, обеспечивающие автоматическую настройку параметров (не требует предварительного обучения). Также преимуществом метода является возможность его применения в случае наличия ограниченных выборок данных. Апробация метода выполнена с использованием данных критической частоты ионосферного слоя F2, полученных с помощью вертикального радиозондирования ионосферных станций, расположенных в Камчатском регионе (координаты станции 53°СШ и 158°ВД, Россия, ИКИР ДВО РАН) и Вакканай (координаты станции 45°СШ и 141°ВД, Япония, WDC-ISW, NICT). Проведено исследование поведения ионосферы в периоды повышенной солнечной активности и геомагнитных бурь, анализировались события 2018-2023 гг. Экспериментально подтверждена эффективность метода.

Работа выполнена за счет Гос. задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

Авторы благодарны организациям, чьи данные были использованы в исследовании.

Литература

1. Данилов А.Д., Константинова А.В. Изменения в области F ионосферы перед магнитными бурями (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. - 2023. - Т. 63. - №6. - С. 683-698. doi: 10.31857/S0016794023600801.
2. Nusinov A. A., Kazachevskaya T. V., Katyushina V. V. Solar Extreme and Far Ultraviolet Radiation Modeling for Aeronomic Calculations // Remote Sensing. - 2021. Vol. 13. - №8. - P. 1454. doi: 10.3390/rs13081454.
3. Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Y. Hybrid Model for Time Series of Complex Structure with ARIMA Components // Mathematics. - 2021. - Vol.9. - P. 1122. doi: 10.3390/math9101122.
4. Mandrikova O., Polozov Y. Complex approach to the detection of ionospheric anomalies based on ionospheric foF2 critical frequency data // Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. - 2023. - P. 127807J. doi: 10.1117/12.2690918.

Особенности применения алгоритмов контуризации изображений: накопленные данные датчика Шака-Гартмана

Максим Б. Дрига¹, Артем Ю. Шиховцев¹, Павел Г. Ковадло¹

¹ Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

driga@iszf.irk.ru

В работе обсуждаются проблемы контуризации изображений солнечных объектов, полученных в фокальной плоскости датчика Шака-Гартмана, основного элемента макета системы адаптивной оптики Большого Солнечного Вакуумного Телескопа. Предлагается алгоритм для распознавания границ субапертур и контуров солнечных пятен. В основе алгоритма лежат методы фильтрации изображений и Джона-Кэнни. Полученные результаты могут быть использованы при оценке характеристик атмосферной оптической турбулентности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10043, [https://rscf.ru/project/24-72-10043/»](https://rscf.ru/project/24-72-10043/).

Ключевые слова: Турбулентность, параметризация

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский Научный Фонд", грант 24-72-10043

Анализ градовых облаков на европейской территории России в теплый период 2024 года на основе различных данных

Надежда А. Ерошкина^{1,2}, Александр В. Чернокульский², Александр А. Спрыгин³, Алексей В. Бугримов², Юрий Б. Павлюков¹, Даниил П. Коренев^{1,4}

¹ Центральная Аэрометеорологическая Обсерватория

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

³ НПО "Тайфун"

⁴ Московский физико-технический институт (государственный университет)

nadezhda_eroshkina@mail.ru

Проанализированы характеристики градовых облаков (градовых очагов) в тёплый период 2024 года на европейской территории России на основе различных независимых источников информации. Сведения о местоположении и времени выпадения града была собрана на основе Европейской базы данных опасных явлений погоды (ESWD) и данных штормовых сообщений, полученных от сети гидрометеорологических станций Росгидромета. На основе данных наблюдений на радиолокационной сети Росгидромета оценены характерные значения радиолокационных параметров в очагах града, таких как радиолокационная отражаемость, дифференциальная отражаемость, высота верхней границы облачности и вертикально интегрированная водность, на различных этапа развития очага, а также исследованы время жизни и скорость перемещения очага. На основе данных грозопеленгационных систем оценено количество молниевых разрядов вблизи градовых очагов, проанализировано изменение количества молниевых разрядов в зависимости от размера выпавшего града.

Результаты анализа дают представление о вертикальной структуре градовых очагов, отмеченных в центральных регионах России, а также об изменении количества молниевых разрядов непосредственно перед началом выпадения града из очага мощной конвекции.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский Научный Фонд", грант 24-17-00357

Особенности определения температурных инверсий с помощью микроволнового радиометра на наблюдательной станции в Петергофе

Кристина А. Шпак¹ , Никита А. Зайцев¹ , Владимир С. Косцов¹ , Евгений Ю. Небосько¹ , Дмитрий В. Ионов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

k.shpak@spbu.ru

Отрицательный вертикальный градиент температуры в тропосфере, или явление температурной инверсии, играет особую роль в формировании погодных условий, воздействии на качество воздуха и экологическую обстановку.

Поскольку наличие температурных инверсий тесно связывают с наблюдением высокого уровня загрязнения воздушного бассейна, тема возможности локального определения таких метеорологических условий остается актуальной.

В данной работе выполнен анализ профилей температуры с инверсией, полученных с помощью измерений MKB радиометром RPG-HATPRO на вышке станции мониторинга СПбГУ РЦ «Геомодель» в Петергофе, с 2013 по 2023 гг.

Исходя из наблюдаемых особенностей восстановленных профилей и возможностей прибора, были выработаны критерии отбора для сопоставления результатов с профилями радиозондирования в пос. Войково.

Рассчитаны средние значения основных параметров температурных инверсий (интенсивность, мощность и высота начала инверсии) в регионе за указанный период. Продемонстрированы возможности и ограничения использования данных радиометра для выявления случаев температурной инверсии.

Работа выполняется при поддержке СПбГУ, шифр проекта 103752493 или 124032000029-9

СЕКЦИЯ 3. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Председатель: д.т.н. **Будак В.П.** (НИУ МЭИ, Москва, Россия), к.ф.-м.н. **Зеге Э.П.** (ИФ им. Б.И. Степанова НАБ, Беларусь)

Устные доклады

Численное моделирование переноса поляризованного излучения в пространственно неоднородных облаках и осадках.

Ярослав А. Илюшин^{1,2}, Ярослав В. Копцов¹, Борис Г. Кутузов²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук

ilyushin@physics.msu.ru

В докладе систематизируются результаты проведенных авторами численных исследований переноса поляризованного электромагнитного излучения в облаках и осадках.

В рамках единого вычислительного подхода исследованы различные теоретические и прикладные задачи. Основой принятого авторами подхода к исследованию является конечно-разностная схема для векторного уравнения переноса излучения со встречными разностями, реализованная авторами для одномерных, двумерных и трехмерных задач. Вычисления эффективно реализованы на высокопроизводительном суперкомьютерном параллельном кластерном оборудовании комплексов НИВЦ МГУ «Чебышев», «Ломоносов» и «Ломоносов-2». Благодаря применению техники параллельных вычислений достигнуто значительное повышение производительности расчетов.

Наиболее детально авторами исследованы задачи переноса теплового радиоизлучения микроволнового диапазона в кучевых облаках и дождевых осадках, обладающих преимущественной ориентацией несферических падающих дождевых капель и как следствие, анизотропией рассеяния электромагнитного излучения. Проведены расчеты для моделей однородного плоскопараллельного дождевого слоя и трехмерных кубических дождевых ячеек для различных значений интенсивности выпадающих дождевых осадков (1-100 мм/ч) и нескольких длин волн микроволнового излучения (3, 8, 15 и 22 мм), соответствующих рабочим диапазонам радиометрической и радиолокационной аппаратуры микроволнового диапазона. По результатам расчетов показана взаимосвязь интенсивности и поляризации наблюдаемого излучения с интенсивностью выпадающих осадков. Как следует из полученных результатов, наблюдение и анализ интенсивности и поляризации теплового радиоизлучения дождевых осадков на нескольких длинах волн одновременно позволяет идентифицировать ячейки дождевых осадков в атмосфере и оценить интенсивность их выпадения. Также исследованы эффекты, связанные с наклоном осей падающих дождевых капель несферической формы. Показано, что предположение о наклоне осей дождевых капель позволяет в целом объяснить наблюдаемые закономерности в поведении третьего параметра Стокса U . Кроме того, исследована зависимость интенсивности и поляризации наблюдаемого излучения от свойств подстилающей поверхности, в т.ч. при наличии частичного ламбертовского отражения.

Кроме того, исследовано распространение в тонких облачных слоях импульсов лазерного излучения различной поляризации. Исследованы различные схемы зондирования облачных слоев с различным направлением зондирования, в том числе горизонтального зондирования с летательных аппаратов. Анализ поляризации рассеянного излучения позволил выявить физические закономерности распределения интенсивности и поляризации излучения в диффузном рассеянном световом поле в пределах слоя рассеивающей среды. Выявленные закономерности в свою очередь дали возможность сформулировать критерии проявления наблюдаемых эффектов рассеяния и указать возможности решения обратной задачи, т.е. оценки толщины рассеивающего слоя среды и её микрофизических параметров.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Решение трёхмерных задач переноса излучения методом квазидиффузии

Владимир П. Будак¹, Павел А. Смирнов¹

¹ Научно-исследовательский университет "МЭИ", Россия

budakvp@gmail.com

В настоящее время остаётся актуальным моделирование переноса излучения в средах с произвольной трёхмерной геометрией. Для таких систем, ввиду бесконечной вариативности вряд ли возможно универсальное аналитическое решение, а существующие методы численного моделирования оказываются либо грубыми, либо медленными, ввиду необходимости дискретизации. Популярный метод независимого пикселя (IPA) в таких задачах не видится эффективным, т. к. несмотря на учёт изменения угла падения излучения, по-прежнему принимает допущение плоскослоистой среды. Методы Монте-Карло требуют большого числа итераций и лучей для качественного решения анизотропной части и построения тела яркости на больших глубинах. Хорошим решением в данной ситуации оказалось применение изначально приближённых инженерных методов, поставленных на мощную вычислительную базу существующих численных методов.

Мы предлагаем одно из таких решений на базе выделения анизотропной части в виде малоугловой модификации метода сферических гармоник (МСГ) и решения регулярной части в виде квазидиффузационного приближения. Для такого решения применяется модифицированное уравнение переноса излучения (УПИ) с модификацией граничных условий для учёта плохой аппроксимации МСГ обратного рассеяния. Однако, прямое рассеяние для малых оптических толщ МСГ аппроксимирует достаточно точно. С увеличением оптической толщи тело яркости начинает сглаживаться, в его формировании всё больше принимает участие регулярная часть, а сама форма приближается к изотропной. В такой ситуации выгодно применение квазидиффузационного приближения на основе первых двух гармоник МСГ. Дальнейшее уточнение делается применением первой синтетической итерации, что обеспечивает соответствие точному расчёту однократного рассеяния и приближенный учёт многократного.

Для анализа полученных решений мы приводим сравнения решений для разных оптических толщ в плоскослоистой среде в сравнении с методами Монте-Карло и MDOM, а также для цилиндров разных радиусов. Для решения регулярной части методом квазидиффузии мы используем специальную программную среду численных решений дифференциальных уравнений.

Полученные решения при близком совпадении по точности многократно превосходят сравниваемые аналоги в скорости решения задач для выбранной геометрии. Это обосновывает применение предложенных методов в других задачах произвольной трёхмерной геометрии.

Стоит отметить, что предлагаемый подход применим во всех задачах моделирования переноса излучения в лучевом приближении. Среди которых по прежнему остаются актуальными: задача сумеречного дистанционного зондирования, когда атмосфера просвечивает самый мощный доступный источник – Солнце, а также обычное зондирование атмосферы и океана, в таких случаях нельзя пренебречь трёхмерной формой элементов среды и подстилающей поверхности; зондирование поверхности Земли с целью мониторинга и поисков полезных ресурсов, где необходима скорость и точность с учётом широких спектральных характеристик излучения, больших толщ и трёхмерной геометрии среды; медицинские задачи диагностики и облучения живых сред, которые вариативны, динамичны и требуют учёта трёхмерной структуры; задачи моделирования трёхмерных структур специальных составных и композитных материалов обладающих требуемыми характеристиками отражения, поглощения и рассеяния; задачи трёхмерного имитационного моделирования оптических исследований для определения характеристик отражения и пропускания компонентов с учётом рассеяния.

Оценка чувствительности метода ИК спектроскопии для детектирования содержания радиоактивных изотополов водяного пара

Татьяна Чеснокова¹, Алексей Ченцов¹, Борис Воронин¹, Геннадий Колотков¹

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

ches@iao.ru

Существуют различные источники радиоактивных изотополов H_2O на Земле. Они могут образовываться в атмосфере при взаимодействии с излучением из космоса, а также во время грозовых разрядов и с осадками поступать в водоемы и почву. Более значимы техногенные источники радиоактивных изотополов H_2O . Большое количество тритиевых изотополов HTO и T_2O выбрасывается во время аварий на АЭС и ядерных взрывах. Например, после аварии на АЭС «Фукусима» в окружающую среду попало около 0,2–0,21 ПБк трития [1]. Радиоактивная вода, как и ее испарения представляют опасность для всего живого, поэтому необходим мониторинг содержания радиоактивных изотополов H_2O в воде и воздухе.

Наиболее долгоживущими кислородными радиоактивными изотопами водяного пара являются $H_2^{14}O$, $H_2^{15}O$ и $H_2^{19}O$, среди радиоактивных водородных изотополов наиболее долгоживущие тритиевые изотопы HTO и T_2O (период полураспада трития 12,32 г.), поэтому они наиболее перспективны среди радиоактивных изотополов H_2O с точки зрения регистрации ИК спектра и обнаружения в испарениях радиоактивной воды. В настоящее время существует очень малое количество измерений спектров поглощения радиоизотополов H_2O , и наши теоретические расчеты спектров поглощения могут помочь обнаружить эти вещества в испарениях радиоактивной воды. В отличие от имеющихся в настоящее время методов, основанных на заборе проб и регистрации бета-излучения, метод ИК спектроскопии может измерять малое содержание изотополов неинвазивно и в режиме реального времени.

В нашей работе исследуется чувствительность метода ИК спектроскопии для измерения содержания $H_2^{19}O$, $H_2^{15}O$, $H_2^{14}O$ и тритиевых изотополов HTO и T_2O в испарениях радиоактивной воды. На основе наших новых теоретических расчетов линий поглощения $H_2^{19}O$, $H_2^{15}O$, $H_2^{14}O$ [2-4] и расчетов HTO , T_2O [5] проведено моделирование пропускания излучения при широком варьировании концентраций изотополов. С учетом перекрывания линий поглощения найдены спектральные интервалы в ИК диапазоне, наиболее перспективные для обнаружения данных изотополов в водяном паре. Сделаны оценки пороговых значений их концентраций, которые могут быть обнаружены в спектрах поглощения водяного пара в лабораторных и атмосферных условиях. Показано, что изотопы $HT^{16}O$ и $T_2^{16}O$ могут быть обнаружены в парах тритиевой воды при их содержании 0,01–0,05% от содержания $H_2^{16}O$ в зависимости от спектрального интервала. Изотопы $H_2^{19}O$, $H_2^{15}O$, $H_2^{14}O$ хорошо обнаруживаются в спектре радиоактивного водяного пара при их содержании более 0,1% от содержания $H_2^{16}O$.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИОА СО РАН.

1. K. Kheamsiri, D. Anderson, H. Tazoe, et al. Elevated levels of tritium in surface water collected in the immediate aftermath of the Fukushima accident // Environmental Pollution. 2025. P.126040
2. Voronin B.A., Tennyson J., Yurchenko S. N., Chesnokova T.Yu., Chentsov A.V., Bykov A.D., Makarova M.V., Voronina S.S., Cruz F.C. // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, V.311, 2024, N.124007, P.1-12.
3. B.A. Voronin, J. Tennyson, T.Yu. Chesnokova, A.V. Chentsov, A.D. Bykov // Mol Phys. 2024. V.122. N5.
4. B.A. Voronin, J. Tennyson, T. Yu. Chesnokova, A. V. Chentsov, A. D. Bykov // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2024. V. 333. P. 4945-4954
5. <https://spectra.iao.ru/molecules>

Коэффициенты уширения и сдвига колебательно-вращательных линий HF возмущенного гелием в фундаментальной области и области первого обертона

Руслан Е. Асфин¹, Ольга О. Дьячкова¹, Игорь А. Толстиков¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

g.asfin@spbu.ru

Спектры газообразного фтористого водорода в смеси с гелием в области фундаментальной полосы и полосы первого обертона были зарегистрированы в кювете из нержавеющей стали с сапфировыми окнами с разрешением 0.005 см^{-1} . Каждая колебательно-вращательная линия в этих полосах была аппроксимирована профилем Фойгта. Была построена зависимость параметров этого контура, таких как частота максимума и Лоренцевская ширина от полного давления смеси при постоянном парциальном давлении HF, и в результате линейной регрессии этих зависимостей были получены коэффициенты сдвига и уширения линий. Эти коэффициенты также были получены и другим путем. Они рассматривались как параметры во время одновременной подгонки совокупности спектров при постоянном давлении HF. Оба метода дали схожие результаты. Для реализации второго способа была разработана специальная программа. Такой путь открывает возможность использования более продвинутых контуров для подгонки экспериментальных линий.

Коэффициенты получены для линий с номерами $m = -10 \dots +10$ как в фундаментальной области, так и в области обертона. Большинство значений получено впервые. Полученные данные были сравнены с существующими литературными данными как для системы HF-He, так и для систем HCl-He, HBr-He и HI-He [1,2].

1. G. Li, R.E. Asfin, A.V. Domanskaya, V. Ebert, *Molecular Physics* **116** 3495–3502 (2018).
2. A.V. Domanskaya, M.O. Bulanin, K. Kerl, C. Maul, *J. Mol. Spectrosc.* **253** 20–24 (2009).

Исследование было поддержано ресурсными центрами "Геомодель" и "Криогенный отдел" научного парка СПбГУ

Исследование проведено при поддержке:

1. "Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ)", грант 25-23-00113

СЕКЦИЯ 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ с ОБЛАКАМИ и АЭРОЗОЛЕМ

Председатель: д.ф-м.н. **Горчаков Г.И.** (ИФА РАН, Москва, Россия)

Сопредседатель: д.г.н. **Виноградова А.А.** (ИФА РАН, Москва, Россия), д.ф-м.н.

Петрушин А.Г. (ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск, Россия), д.ф-м.н. **Михайлов Е.Ф.**

(СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Устные доклады

Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в нефотохимических смогах на Северной Китайской Равнине

Геннадий И. Горчаков¹, Алексей В. Карпов¹, Роман А. Гущин¹, Олег И. Даценко¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

gengor@ifaran.ru

В январе 2013 г. на Северной Китайской Равнине возникли плотные смоги с массовыми концентрациями тонкодисперсного аэрозоля порядка сотен мкг/м³, которые привлекли внимание широкого круга специалистов. Обнаружен новый нефотохимический механизм образования смогов, в которых происходит быстрое накопление сульфатов, обусловленное каталитическим окислением сернистого газа молекулярным кислородом [1]. Большой интерес представляет микроструктура этих смогов и поглощательная способность образовавшегося в нефотохимических смогах аэрозоля.

Анализ показал, что в нефотохимических смогах доминирует тонкодисперсная фракция аэрозоля. Благодаря быстрому накоплению сульфатов в ряде случаев оптически плотные смоги оказываются слабо поглощающими (альбедо однократного рассеяния 0.99). В значительной части случаев в частицах смога наряду с чёрным углеродом присутствует коричневый углерод.

В смогах на Северной Китайской Равнине (станция AERONET Taihu) обнаружено аномальное селективное поглощение аэрозоля. При этом мнимая часть коэффициента преломления на длине волны 1020 нм достигала примерно 0.11. Проанализированы вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозолей при возникновении в смогах аномального селективного поглощения. В частности, обнаружены отклонения от характерной для зимних смогов г. Пекина бимодальности распределения частиц по размерам.

1. Ермаков А.Н. О новом режиме каталитического окисления сульфита в присутствии Mn(II) в избытке ионов металла // Кинетика и катализ. 2023. Т.64, № 1. С. 86-96.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Госзадание ИФА им. А.М. Обухова РАН", грант №125020501413-6

Исследования поглощающих и гигроскопических свойств аэрозоля в атмосфере оз. Байкал летом 2024 г.

Светлана А. Терпугова¹, В Полькин¹, Е П. Яушева¹, М В. Панченко¹, Т В. Ходжер², В П. Шмаргунов¹

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

² Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук

swet@iao.ru

Представлены результаты исследований микроструктурных и физико-химических свойств приводного аэрозоля в атмосфере котловины оз. Байкал летом 2024 г. на борту научно-исследовательского судна «Академик В.А. Коптюг». Подтверждено, что в отсутствие дымовых шлейфов лесных пожаров пространственное распределение аэрозоля над акваторией озера, а также содержание черного углерода в составе частиц определяются расположением антропогенных источников.

Впервые приведены характеристики гигроскопичности и летучести вещества аэрозоля атмосферы оз. Байкал, зависящие от размера частиц. Повышенные значения оптического параметра конденсационной активности наблюдались в северо-восточной части озера (чистые фоновые районы), а наименьшие – в юго-западной части, где высоко влияние антропогенных загрязнений. Выявленные особенности гигроскопичности аэрозоля в различных частях Байкальского региона находятся в согласии с данными о его химическом составе. Такие же различия между чистыми и загрязненными районами характерны и для микрофизического параметра конденсационной активности самой мелкой регистрируемой фракции частиц. Зависимость параметра конденсационной активности от радиуса частиц характеризуется максимальным значениями и наибольшей изменчивостью в субмикронном диапазоне и резким снижением с увеличением радиуса. Вклад крупных частиц $r > 2$ мкм в конденсационную активность аэрозоля составляет менее 0,05.

Большие значения доли высоколетучих веществ отмечаются в районах с низкой замутненностью, а нелетучих, наоборот, с высокой. Характерной особенностью зависимости термических параметров от размера частиц является снижение относительного количества летучих веществ и, соответственно, увеличение доли нелетучих с ростом радиуса.

Разработка методов и приборов выполнены в рамках госзадания ИОА СО РАН рег. № ЕГИСУ 121031500342-0; экспедиционные работы, обработка и анализ результатов проведены при поддержке гранта РНФ № 19-77-20058-П.

Исследование проведено при поддержке:

1. "госзадание ИОА СО РАН", грант 121031500342-0
2. "Российский научный фонд", грант 19-77-20058-П

Многолетние измерения концентрации черного углерода в воздушном бассейне г. Москвы

Алексей В. Карпов¹, Геннадий И. Горчаков¹, Валерий С. Козлов¹, Роман А. Гущин¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

karpov@ifaran.ru

Элементный углерод (черный углерод, сажа) в атмосферном воздухе присутствует в виде аэрозольных частиц размером, преимущественно, не более 2.5 мкм. Являясь, в большинстве своем, продуктом неполного сгорания топлива, черный углерод считается одним из основных показателей антропогенного загрязнения атмосферы. Необходимость изучения сажевого аэрозоля обусловлена, прежде всего, его уникальными оптическими свойствами, благодаря которым он заметно влияет на характеристики проходящего сквозь атмосферу солнечного излучения и на альbedo подстилающей поверхности (прежде всего, снежного покрова), при осаждении на неё сажевых частиц [1].

В период с 1989 года по настоящее время в пункте наблюдений, расположеннном в здании Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН по адресу г. Москва, Пыжевский пер., д.3, проводятся измерения концентрации сажевого аэрозоля в приземном слое атмосферы. Место измерений находится в плотной городской застройке, недалеко от автотрасс с большой автомобильной нагрузкой.

До начала 2022 года измерения проводились с помощью оператора, осуществляющего отбор аэрозольных проб на фильтры и последующего анализа данных об изменении коэффициента поглощения оптического излучения фильтром с отобранный пробой по сравнению с чистым фильтром. Отбор проб на фильтры производился оператором по рабочим дням в дневные часы [2].

С января 2022 г. измерения проводятся в автоматическом режиме с помощью измерителя концентрации частиц сажевого аэрозоля (Аэталометра). Ряд данных измерений концентрации черного углерода в атмосфере, получаемый с помощью Аэталометра, характеризуется высоким временным разрешением (1 минута) и малыми периодами пропуска данных.

По данным многолетних измерений были рассчитаны среднегодовые значения массовой концентрации частиц сажевого аэрозоля в воздушном бассейне г. Москвы и выявлены два основных периода, один из которых характеризуется хорошо выраженным трендом на снижение концентрации сажевого аэрозоля в атмосфере г. Москвы, а второй – отсутствием сколько-нибудь заметного тренда.

С помощью ряда данных 2022 – 2024 гг. круглосуточных измерений концентрации сажевого аэрозоля с высоким временным разрешением были рассчитаны среднегодовые значения массовой концентрации сажевого аэрозоля по всему массиву данных и по выборке в дневные часы (в соответствии с режимом отбора проб при измерениях 1989 – 2021 гг.). Показано, что отличия двух способов оценки среднегодовых значений массовой концентрации черного углерода в атмосфере составляют не более 4%.

Литература

1. Шевченко В.П., Копейкин В.М., Новигатский А.Н., Малафеев Г.В. Черный углерод в приводном слое атмосферы над Северной Атлантикой и морями Российской Арктики в июне–сентябре 2017 г. // Океанология. 2019. том 59, № 5, с. 771–776.
2. Копейкин В.М., Пономарева Т.Я. Зависимость вариаций содержания сажи в атмосфере Москвы от направления переноса воздушных масс. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 10. С. 811–817.

Исследование проведено при поддержке:

Особенности пропускания УФИ облаками разных форм

Сергей В. Смирнов^{1,2}, Константин Н. Пустовалов^{1,2}, Петр М. Нагорский¹, Мария В. Оглезнева¹

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук

² Национальный исследовательский Томский государственный университет

smirnov@imces.ru

Известно, что на изменчивость потока УФИ, достигающего подстилающей поверхности, оказывают влияние такие факторы, как общее содержание озона, облачность, аэрозоль, некоторые малые газовые составляющие, альbedo подстилающей поверхности и другие факторы. При этом основной вклад в изменение падающего потока УФИ, в особенности, его длинноволновой части, где влияние озона минимально, вносит облачность.

Ранее для Томска были получены оценки изменчивости прозрачности атмосферы в УФ длинноволновом диапазоне (на длине волны 380 нм) для так называемых условий «хорошей погоды» и метеорологических условий, связанных с наличием в атмосфере большого количества дыма от лесных пожаров. Однако оценки влияния облаков основных форм на изменчивость прозрачности атмосферы в вышеназванном спектральном диапазоне ранее не проводились. Поэтому цель данного исследования – получение этих оценок, их анализ и сравнение с аналогичными оценками для условий «хорошей погоды».

Для оценки спектральной прозрачности атмосферы, обусловленной облаками основных форм, были использованы данные многоканального фильтрового радиометра NILU-UV-6T, полученные в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН в течение 2006–2020 гг. Радиометр измеряет энергетическую освещённость в ультрафиолетовой и видимой спектральных областях на длинах волн 305, 312, 320, 340 и 380 нм и в диапазоне 400–700 нм. Прилагаемое к прибору программное обеспечение позволяет рассчитывать относительную прозрачность атмосферы на длине волны 340 или 380 нм, обусловленную облачностью и аэрозолем. В нашем случае прозрачность была рассчитана для 380 нм.

Информация об облачности и метеорологических явлениях была использована с расположенной в 6 км от обсерватории гидрометеорологической станции «Томск».

Для оценки влияния той или иной формы облачности на прозрачность был проведён отбор случаев с наличием в сроки наблюдения на метеостанции только одной из основных форм облаков: *Ci*, *Cc*, *Cs*, *Ac*, *As*, *St*, *Sc*, *Ns*, *Cu* и *Cb*, при отсутствии облаков других форм. Для *Cb* допускалось наличие *Cu*. Дополнительным условием при выборке случаев с кучево-дождовыми, слоисто-дождевыми и слоистыми облаками являлось наличие осадков (ливневых, обложных и моросящих соответственно). В расчёт брались среднеминутные значения прозрачности за 30-мин интервалы относительно метеорологического срока, т. е. 00 UTC±15 мин, 03 UTC±15 мин и т. д., когда наблюдались облака конкретных форм. Критериями условий «хорошей погоды» при проведении сравнительного анализа изменчивости прозрачности были приняты следующие характеристики: количество облаков не более 5 баллов, отсутствие облачности нижнего яруса и вертикального развития, отсутствие грозы, осадков, тумана, мглы, метели, пыльной бури и задымления, средняя скорость приземного ветра не более 6 м/с.

В результате проведённого исследования получены оценки изменчивости и повторяемости относительной прозрачности атмосферы в УФ длинноволновом диапазоне (380 нм) в присутствии облаков основных форм. Определено, что средние и медианные значения прозрачности при наличии облачности значительно ниже значений, характерных условиям «хорошей погоды». Анализ показал, что при уменьшении высоты нижней границы облаков отмечается уменьшение прозрачности ($R=0,74$). Распределение повторяемости прозрачности в *Sc*, *Ac* и *Cc* является двухмодальным. Дисперсии значений прозрачности для большинства облаков, кроме *St* и *Ns*, выше, чем для условий «хорошей погоды».

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.

Коричневый углерод в зимних смогах г. Пекина

Олег И. Даценко¹, Геннадий И. Горчаков¹, Алексей В. Карпов¹, Роман А. Гущин¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

datsenko@ifaran.ru

На процессы переноса коротковолновой солнечной радиации в антропогенно обусловленных смогов влияет поглощение чёрным углеродом. В [1] показано, что заметный вклад в поглощении радиации смогами может вносить также «коричневый углерод» (BrC), который представляет собой органические соединения с широкой полосой поглощения в ультрафиолетовой области спектра. В [2] описан новый нефотохимический механизм образования зимних смогов, на которое было обращено внимание исследователей в январе 2013 г.

В связи с этим возникла новая задача исследования изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в нефотохимических смогах, вариаций содержания чёрного углерода и коричневого углерода в зимних смогах г. Пекина.

В настоящей работе проанализирована изменчивость функции распределения частиц по размерам, аэрозольной оптической толщины ослабления, мнимой части коэффициента преломления и альбедо однократного рассеяния в зимних смогах г. Пекина. Рассчитаны статистические характеристики вариаций оптических характеристик аэрозоля в зимних смогах г. Пекина. Изучены статистические связи содержания коричневого и чёрного углерода с аэрозольной оптической толщиной.

1. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гущин Р.А., Даценко О.И., Семутникова Е.Г. Черный и коричневый углерод и селективное поглощение радиации дымовым аэрозолем при массовых лесных пожарах на Аляске в 2019 г. и в Канаде в 2023 г. // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т.38, № 1. С. 32-38.
2. Прончев Г. Б., Ермаков А. Н. Механизм нефотохимического образования и оценка скорости накопления сульфатов в атмосферной дымке // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38, № 3. С. 178-184.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Госзадание ИФА им. А.М. Обухова РАН", грант №1022041800069-7-1.5.9.

Наблюдения аэрозоля Сибирских лесных пожаров в стратосфере

Александр А. Черемисин¹, Илья И. Романченко, Павел В. Новиков, Валерий Н. Маричев, Дмитрий А. Бочковский

¹ Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Россия

aacheremisin@gmail.com

Стратосферный аэрозоль является важным климатообразующим фактором и играет важную роль во многих атмосферных физико-химических процессах. Соответственно изучение источников этого аэрозоля является существенным аспектом исследования стратосферы.

В настоящее время известно, что значительный вклад в аэрозольное наполнение стратосферы вносят вулканические продукты извержений. В качестве источника сажевого аэрозоля в стратосфере рассматривались выбросы авиационных двигателей. С развитием высокотехнологических систем наблюдений на спутниках удалось обнаружить, что сажевые аэрозольные частицы также могут проникать в стратосферу за счет образования мощных пирокумулятивных облаков, возникающих в областях обширных лесных пожаров. Случаи пирокумулятивные выбросов в стратосферу зафиксированы в Канаде, США и Австралии.

В докладе будут представлены результаты исследования переноса в стратосфере Северного полушария сажевого аэрозоля лесных пожаров в Восточной Сибири в 2019 [1] и 2022 г. и локализации мест и времени образования мощных пирокумулятивных облаков. В работе использовались данные наземной лидарной стратосферной станции в ИОА СО РАН в Томске, космического лидара CALIOP на спутнике CALIPSO, радиометров системы VIIRS на спутнике Suomi-NPP, а также данные о яркостной температуре верхушек облаков и визуальных наблюдений со японского спутника Himawari-8 и результаты траекторного анализа с привлечением данных по скоростям ветра GDAS.

В начале лета 2019 г. произошло мощное извержение вулкана Райкоке, что осложнило интерпретацию результатов наблюдений, так как при этом произошло существенное наполнение стратосферы вулканическим аэрозолем. Пожары и вулканическое извержение является альтернативными гипотезами для источников аэрозольного наполнения стратосферы в июле-августе 2019 г. Для выявления происхождения аэрозоля была разработана комплексная методика с применением наземных и спутниковых систем наблюдений за атмосферой.

1. Черемисин А. А., Маричев В. Н., Бочковский Д. А., Новиков П. В., Романченко И. И. Стратосферный аэрозоль сибирских лесных пожаров по данным лидарных наблюдений в Томске в августе 2019 г. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 898–905.

Аэрозоль в лабораторном аналоге шаровой молнии

Александр А. Черемисин¹, Егор А. Шишkin, Михаил А. Соловьев

¹ Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Россия

aacheremisin@gmail.com

Шаровая молния до сих пор остается практически не изученным атмосферным явлением, которое привлекает к себе внимание многих исследователей, стремящихся понять его природу. В 2000 году в г. Гатчине был обнаружен особый тип импульсного высоковольтного электрического разряда над водной поверхностью [1]. При разряде формируется ярко светящийся шарообразный объект (называемый в литературе плазмоидом). При этом время жизни светящегося шара довольно велико и может достигать 0.6 с, при типичном времени гальванического контакта плазмоида с электродами около 0.1 с.

В настоящее время этот объект изучается во многих лабораториях мира, например, в США, Китае, Японии, Германии, Чехословакии и России. Многие исследователи рассматривают этот тип разряда как лабораторный или искусственный аналог природной шаровой молнии. Между тем, этот объект все еще остаётся недостаточно изученным.

В работе обсуждаются результаты изучения этого образования, полученные в лабораториях разных стран, а также результаты экспериментального исследования, выполненного на разрядной установке, собранной в ИХКГ СО РАН.

Обнаружен интересный факт, что при прохождении лазерного пучка через плазмоид отчетливо наблюдается рассеяние лазерного излучения на аэрозольных частицах разного размера. Установлено, что внутренняя часть плазмоида заполнена водным аэрозолем среднедисперсного и субмиллиметрового диапазонов [2]. Представлены также результаты экспериментального исследования с целью проверки гипотезы о механизме продолжительного свечения плазмоида за счет реакций в дисперсной фазе.

Наблюдение водного аэрозоля при атмосферном давлении, свидетельствует о том, что температура внутри ярко светящегося объекта не превосходит 100 °С. Это противоречит предположению о плазменной природе исследуемого объекта на стадии его автономного существования.

1. Шабанов Г.Д. О возможности создания природной шаровой молнии импульсным разрядом нового вида в лабораторных условиях // Успехи физических наук. 2019. № 1. С. 95–111.
2. Черемисин А.А., Исаков В.П., Шишkin Е.А. и др. Водный аэрозоль в искусственном аналоге природной шаровой молнии // Вестник РАН. 2023. Т. 93. №2. С. 171–178.

Мониторинг актинометрических параметров на территории Польши в мае 2024 года

Ольга А. Гудошникова¹

¹ Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Войейкова

guggopo@gmail.com

Европейская служба «Коперник» (C3S) заявила, что май 2024 г. оказался по величине средней глобальной майской температуры теплее: на 1,52⁰С относительно доиндустриального периода 1850-1900 гг. и на 0,65⁰С относительно периода 1991-2020 гг. Май 2024 года стал 12-м месяцем подряд с рекордно высокими температурами воздуха, если началом отсчета брать июнь 2023 года. По мнению экспертов причиной потепления стали выбросы парниковых газов.

Во всей Польше в 2024 году отмечались только превышения месячных температурных норм. Согласно квантильной классификации, термические условия в мае этого года, определенные по средней температуре в Польше, были оценены как «чрезвычайно теплые». В то же время, для европейской части России первая декада мая 2024 года оказалась самой холодной за всю историю наблюдений. Росгидрометцентр указывал сразу на несколько причин экстремально низких температур.

Цель работы - обратить внимание на описанный феномен. В статье приводятся сведения о погоде на территории Польши в мае 2024 г. Изучены наблюдения на четырех метеорологических станциях, находящихся в разных локациях: на побережье Балтийского моря, в горах, в городе и сельской местности (в восточно-центральной части страны). В исследовании описано влияние физико-географического положения станций на показатели погодных аномалий. Выяснилось, что в мае 2024 г. на всех этих станциях средние месячные значения суммарной солнечной радиации (GSR) превышают аналогичные значения в летние месяцы этого года.

Для анализа использован трехмерный климатологический комплекс: атмосферная радиация, относительная влажность и температура. Автор рассматривает взаимосвязь между GSR, рассеянной радиацией (DSR) и продолжительностью солнечного сияния (SS). В предлагаемом исследовании выделяются периоды в мае 2024 года со значениями GSR, классифицированными автором как «выше средних многолетних суточных актинометрических показателей». В качестве базового периода межгодовой изменчивости GSR взят интервал 10 лет для условий мая. Польские станции ранжированы по показателю СКО. Проведена статистическая обработка наблюдений с использованием метода нормированных отклонений (t). Максимальное значение t получено для ст. Варшава, минимальное для ст. Кошалин, расположенной в 5 км от моря. Примечательно, что для этой же станции в мае наблюдалось максимальное количество дней (61%) с показателями атмосферной радиации выше июньских. Для этой же локации доля DSR в среднем месячном значении GSR оказалась самой низкой: 26%.

Как правило, в последний весенний месяц заметно уменьшается образование облачности и количество осадков, что благоприятствует поступлению большего количества солнечных лучей на поверхность земли. Высказано предположение, что за счет положительных обратных связей, возникающих при тенденции повышения температуры воздуха, уменьшается влагосодержание атмосферы, а это влечет за собой уменьшение компоненты рассеянной радиации, количества облачности и осадков. Возможно, основной причиной, вызвавшей заметно высокие показатели GSR, SS и температуры для мая, стала необычная синоптическая обстановка, сложившаяся над Центральной Европой. Представлен графический материал, иллюстрирующий выводы.

Источником актинометрических данных стал МЦРД (ФГБУ «ГГО», СПб), более 60 лет занимающийся их сбором, контролем качества и публикацией. Сведения о метеорологических наблюдениях получены из бюллетеней за 2024 г., за май 2024 г. (НИИ метеорологии и управления водными ресурсами Республики Польши).

Временная изменчивость массовой концентрации чёрного углерода в приземном субмикронном аэрозоле в г. Москве в 2022- 2025 гг.

Валерий С. Козлов¹, Алексей В. Карпов¹, Геннадий И. Горчаков¹, Роман А. Гущин¹, Олег И. Даценко¹, Адель Р. Вишняк²

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

vkozlov@ifaran.ru

Исследованы особенности временной изменчивости средних суточных, месячных, сезонных и годовых значений концентрации поглощающего чёрного углерода BC в субмикронном аэрозоле по данным круглосуточных измерений в приземном слое воздуха в центре г. Москвы в 2022 – 2025 г.г. с помощью аэталометра AE33-7, размещенного в ИФА РАН им. А.М. Обухова. Анализ показал, что данные годовых измерений различаются особенностями временной изменчивости поглощающего аэрозоля. В 2022г. в летне - осенний период в Московский регион поступали шлейфы дымов сильных лесных пожаров из Рязанской и Нижегородской областей. В июне - августе 2022г. среднесуточные значения достигали максимальных значений $5.0\text{--}15.5 \text{ мкг}/\text{м}^3$, среднемесячный максимум $4.0 \text{ мкг}/\text{м}^3$ наблюдался в августе, а минимум $1.5 \text{ мкг}/\text{м}^3$ – в мае. В 2024г. на измерения влияли жилищные строительные работы в районе наблюдений – среднемесячный максимум $3.3 \text{ мкг}/\text{м}^3$ наблюдался в августе, минимум $1.0 \text{ мкг}/\text{м}^3$ – в декабре. 2023г. характеризовался сравнительно устойчивой аэрозольной ситуацией: среднемесячные максимумы $3 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в апреле и сентябре. Среднесезонные концентрации в 2023г. составили $2.64 \text{ мкг}/\text{м}^3$ весной, $2.10 \text{ мкг}/\text{м}^3$ летом, $2.04 \text{ мкг}/\text{м}^3$ осенью и $1.86 \text{ мкг}/\text{м}^3$ зимой, т.е. весенний и летний сезоны содержат повышенные уровни BC , а минимальное значение наблюдается зимой. Для среднего за год недельного хода BC в 2022г. зависимость характеризуется максимумом $2.90 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в четверг; в 2023г. – содержит два максимума $2.35 \text{ мкг}/\text{м}^3$ во вторник и четверг; в 2024г. происходит уменьшение в течение недели от 2.35 до $1.85 \text{ мкг}/\text{м}^3$. В недельном суточном ходе в 2022 г. в рабочие дни обнаруживается ночной минимум $2.5 \text{ мкг}/\text{м}^3$, утренний максимум $2.9 \text{ мкг}/\text{м}^3$ и дневной минимум $2.2 \text{ мкг}/\text{м}^3$, а в выходные дни утренний максимум $2.9 \text{ мкг}/\text{м}^3$ и ночной минимум $1.9 \text{ мкг}/\text{м}^3$. Таким образом, ночью (до 7:00) средние значения в выходные дни превышают на $0.5 \text{ мкг}/\text{м}^3$ значения для рабочих дней недели (проявление инверсии). В 2023г. при переходе к выходным в ночное время BC уменьшается на $0.6 \text{ мкг}/\text{м}^3$, в дневное – на $0.34 \text{ мкг}/\text{м}^3$. В 2024г. различия в суточных ходах не превышают $0.2 \text{ мкг}/\text{м}^3$ с проявлением ночной (до 5 ч) инверсии. Отмечены устойчивые особенности суточного хода среднесезонных концентраций в 2023г.: 1) весенний максимум $3.4\text{--}3.6 \text{ мкг}/\text{м}^3$; 2) летний максимум $3.06 \text{ мкг}/\text{м}^3$; 3) осенний максимум $2.15 \text{ мкг}/\text{м}^3$; осенний минимум $1.75 \text{ мкг}/\text{м}^3$; 4) зимний минимум $1.30 \text{ мкг}/\text{м}^3$. Ночью среднесезонные концентрации варьируют от $1.3 \text{ мкг}/\text{м}^3$ зимой до $3.5 \text{ мкг}/\text{м}^3$ весной. Днем наблюдаются зимний максимум $2.25 \text{ мкг}/\text{м}^3$ и летний минимум $1.5 \text{ мкг}/\text{м}^3$. В 2022г. суточный ход по динамике согласуется с 2023г. обнаруживая ночью летний максимум $4.7 \text{ мкг}/\text{м}^3$; весенний минимум $2.2 \text{ мкг}/\text{м}^3$; осенний минимум $2.0 \text{ мкг}/\text{м}^3$; зимний минимум $1.70 \text{ мкг}/\text{м}^3$. Днем наблюдаются зимний максимум $3.0 \text{ мкг}/\text{м}^3$ и летний минимум $1.5 \text{ мкг}/\text{м}^3$. Суточный ход в 2024г. значительно отличается от 2022 и 2023г.г. В нем для каждого сезона появились в утренний период суток (9–12 часов) максимумы концентраций BC : $3.0 \text{ мкг}/\text{м}^3$ – для лета; $2.6 \text{ мкг}/\text{м}^3$ – для весны; $2.4 \text{ мкг}/\text{м}^3$ – для зимы; $2.3 \text{ мкг}/\text{м}^3$ – для осени, вероятно обусловленные пылевой нагрузкой.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Госзадание ИФА им. А.М. Обухова РАН", грант №125020501413-6

Стратификация ветропесчаного потока и механизмы сальтации

Роман А. Гущин , Геннадий И. Горчаков , Геннадий И. Горчаков¹ , Алексей В. Карпов¹ , Роман А. Гущин¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

gushchin@ifaran.ru

На Земле и на Марсе важную роль играют недостаточно изученные [1] процессы переноса песчаных и алевритовых частиц в приповерхностном слое атмосферы, которые, в частности, влияют на вертикальное распределение частиц в ветропесчаном потоке. С использованием опубликованных результатов измерений концентрации и плотности потока частиц в ветропесчаном потоке проанализирована изменчивость стратификации ветропесчаного потока. Для количественной оценки изменчивости концентрации ветропесчаного потока предлагается использовать кусочно-экспоненциальную аппроксимацию профилей и безразмерный масштаб высоты. Показано что в ряде случаев на профилях концентрации наблюдаются точки излома профилей, разделяющие слои с различными значениями масштаба высоты. Анализ результатов экспериментальных исследований скорости вылета частиц с подстилающей поверхности в ветропесчаном потоке показал, что существуют моды низкоскоростной и высокоскоростной сальтации. Получены зависимости максимальной высоты траектории сальтирующей частицы от её скорости вылета с подстилающей поверхности. Показано, что механизм классической (аэродинамической) сальтации соответствует нижнему сегменту кусочно-экспоненциального профиля концентрации сальтирующих частиц. Верхний сегмент профиля концентрации может быть обусловлен электродинамической сальтацией (разрядами на подстилающей поверхности), которая допускает возникновение в ветропесчаном потоке высокоскоростных сальтирующих частиц.

1. Zhang Z. C., Dong Z. B., Qian G. Q. Field observations of the vertical distribution of sand transport characteristics over fine, medium and coarse sand surfaces //Earth Surface Processes and Landforms. - 2017. - T. 42. - №. 6. - C. 889-902.

Анализ радиационного форсинга в Атлантическом океане: роль облачности

Алексей В. Синицын¹, Сергей К. Гулев¹

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

sinitsyn@sail.msk.ru

Исследование радиационного баланса Земли основывается на трех ключевых потоках излучения на верхней границе атмосферы: приходящее солнечное излучение, отраженный солнечный поток и исходящее длинноволновое излучение. Эти компоненты являются движущей силой климатической системы планеты. Для их мониторинга используются спутниковые наблюдения, особенно система CERES, признанная золотым стандартом данных о потоках излучения, хотя она имеет ограничения по времени (данные с 2000 года) и пространственному разрешению ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$).

Новые продукты CLARA-A3, разработанные в CM SAF, позволяют преодолеть эти ограничения, обеспечивая более длительный временной ряд с конца 1970-х годов и улучшенное пространственное разрешение до $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. Данные представлены в процентах от сплошного облачного покрытия (0-100%) и $\text{Вт}/\text{м}^2$ для радиационных параметров.

Анализ радиационного форсинга в Атлантическом океане показал значительные изменения в облачности и радиационных потоках. В тропической части океана наблюдается уменьшение общего балла облачности на 16% в зимний период, тогда как в умеренных широтах отмечается его увеличение до +10% для всех сезонов. Эти изменения влияют на приходящий коротковолновый поток: уменьшение облачности приводит к увеличению потока на $20 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в тропической зоне и умеренных широтах.

Изменения облачности также действуют на длинноволновое излучение. При уменьшении облачности происходит увеличение уходящего длинноволнового излучения на $8 \text{ Вт}/\text{м}^2$ из-за открытия "окна прозрачности" атмосферы. На верхней границе атмосферы наблюдается увеличение длинноволнового потока до $12 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в тропической зоне зимой. В областях с увеличением облачности поток уменьшается на $8 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Радиационный баланс формируется за счет взаимодействия коротковолнового и длинноволнового потоков. В южной части Атлантического океана изменения баланса составляют менее $10 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и всегда имеют отрицательное значение. Однако в летний период в умеренных широтах наблюдается положительный баланс благодаря значительному увеличению приходящего коротковолнового потока (около $20 \text{ Вт}/\text{м}^2$), превышающего изменения длинноволнового излучения (до $8 \text{ Вт}/\text{м}^2$).

Таким образом, изменения режима общей облачности и ее составляющих существенно влияют на радиационные процессы в Атлантическом океане. Увеличение приходящего коротковолнового излучения в сочетании с уменьшением облачности приводит к росту уходящего длинноволнового излучения как с поверхности океана, так и с верхней границы атмосферы. При этом радиационный баланс поверхности океана остается близким к нулю, а его изменчивость во времени остается незначительной.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Государственное задание в рамках НИР", грант FMWE-2024-0017

Оценка сезонной изменчивости аэрозольного радиационного форсинга по данным измерений оптических свойств атмосферных аэрозолей на станции ZOTTO

Сергей С. Власенко¹, Анастасия С. Михайлова¹, Евгений Ф. Михайлов¹, Евгений Ю. Небосько¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

Sergey_Vlasenko@mail.ru

Выполнена оценка эффективности аэрозольного радиационного форсинга (RFE) для атмосферы центральной Сибири по данным измерений объемных аэрозольных коэффициентов рассеяния и поглощения, выполненных на фоновой станции ZOTTO (60.80° с.ш., 89.35° в.д.) за период 2007-2024 гг. Коэффициенты аэрозольного рассеяния, в том числе и в обратном направлении, измерялись с помощью нефелометра TSI 3563 на длинах волн 450 нм, 550 нм и 700 нм. Коэффициент аэрозольного поглощения измерялся фотометром PSAP на длине волны 574 нм. По результатам обработки первичных данных были получены почасовые временные ряды интегральных по видимой области спектра коэффициентов аэрозольного рассеяния и поглощения, а также доли излучения, рассеянной в обратном направлении и альбедо однократного рассеяния. Необходимые для аэрозольных климатических оценок значения доли излучения, рассеянного в верхнюю полусферу, рассчитывались по данным о коэффициенте асимметрии индикаторы рассеяния с учетом зенитного угла Солнца в момент измерений. Для расчета аэрозольного форсинга были взяты данные реанализа MERRA-2 о функции пропускания атмосферы, балле облачности и альбедо подстилающей поверхности. Полученный таким образом временной ряд RFE для станции ZOTTO демонстрирует сильную межсезонную изменчивость, но четко выраженную сезонную цикличность. Несмотря на то, что максимальные концентрации поглощающего (сажевого) аэрозоля и, соответственно, максимальные значения коэффициента аэрозольного поглощения наблюдаются в летние месяцы, эффективность аэрозольного форсинга в этот период отрицательна, характерная величина RFE составляет $-30 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Зимой, когда концентрация аэрозолей и аэрозольные оптические коэффициенты существенно ниже, эффективность аэрозольного форсинга положительна и равна примерно $+25 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Среднее значение RFE за период измерений равно $-5 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Смена знака аэрозольного форсинга с положительного на отрицательный происходит в начале мая, а обратная – в конце октября.

Исследование проведено при поддержке:

1. "РНФ", грант 24-27-00148

Постерная сессия

Размерные характеристики пыли и их влияние на радиационные эффекты в атмосфере

Сулейман Мостаманди^{1,2}, Георгий Л. Стенчиков², Георгий Неробелов¹, Юшихидэ Вада²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

² Университет науки и технологий имени короля Абдуллы, Саудовская Аравия

suleiman@mostamandi.ru

Пыль оказывает значительное влияние на окружающую среду, климат, качество воздуха и солнечную энергетику в засушливых регионах, таких как Ближний Восток. Эти эффекты в значительной степени зависят от размеров частиц. Наблюдения осаждения пыли (ОП) показывают, что основную часть осадочной массы составляют крупные частицы (радиус $r > 10$ мкм), однако они практически не учитываются в современных моделях атмосферного аэрозоля, которые в основном согласуются с наблюдаемой оптической толщиной аэрозоля (ОТА) по данным спутниковых измерений. Это приводит к недооцениванию выбросов и осаждению пыли в три раза по данным моделей и реанализа.

В данной работе впервые проводится согласование данных об аэрозолях пыли на основе модели WRF-Chem, используя данные измерения ОТА и ОП, для количественной оценки вклада мелкой и крупной пыли. Получено, что крупные пылевые частицы обеспечивают более 70% общего выброса пыли, но при этом вносят вклад менее 10% в пылевой радиационный форсинг. Среднегодовое значение радиационного форсинга пыли над Аравийским полуостровом и прилегающими морями может локально достигать -25 Вт/м², а в отдельных регионах, например, в южной части Красного моря - до -60 Вт/м². Мелкие частицы пыли ($r < 3$ мкм) вызывают значительное уменьшение приходящего к земной поверхности солнечного излучения (на 5-10%), что приводит к охлаждению поверхности и снижению выработки энергии солнечными генераторами. В осаждении же в основном преобладают крупные частицы пыли, что уменьшает эффективность солнечных генераторов на 2-5% в день.

Полученные результаты подчеркивают необходимость явного учета крупной пыли в атмосферных моделях и системах асимиляции данных. Улучшенное представление распределения пыли по размерам существенно для точного моделирования её баланса и оценки воздействия на региональный климат и солнечную энергетику.

Сезонная изменчивость конденсационных свойств частиц в зоне бореальных лесов Центральной Сибири

Евгений Ю. Небосько¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

zhenia84@gmail.com

Определение способности аэрозольных частиц выступать в роли ядер конденсации и посредством этого контролировать микрофизические свойства облачных систем при соответствующих атмосферных условиях является одной из ключевых задач аэрозольной климатологии, которая описывает климатический эффект аэрозолей. Центральную роль в формировании облаков играют аэрозольные частицы, выступающие в роли облачных ядер конденсации (Cloud Condensation Nuclei, CCN). Увеличение концентрации облачных ядер за счёт антропогенных и естественных источников приводит к увеличению концентрации и уменьшению размера капель в облаках, что, в свою очередь, приводит к изменению времени жизни и оптических свойств облаков. Помимо подобного косвенного влияния на радиационный баланс, это может привести к уменьшению осадков в тонких и короткоживущих облаках, а также к увеличению конвективного перемешивания и увеличению осадков в мощных конвективных облаках [1].

Бореальные леса Центральной Сибири являются уникальной зоной, которая, с одной стороны, удалена от крупных антропогенных источников загрязнения и может считаться приближенной к дикой природе. С другой стороны, эта территория является источником летучих органических соединений (ЛОС) биогенного происхождения, а при неблагоприятных погодных условиях (засуха, жара) быстро распространяющиеся лесные пожары Сибири вносят существенный вклад в выбросы аэрозольных частиц, образующихся при сжигании биомассы. Поэтому мониторинг атмосферных параметров, в частности дисперсных, оптических и конденсационных свойств аэрозоля, на таких фоновых станциях имеют особое значение для изучения влияния дальнего атмосферного переноса и оценки вкладов эмиссий различного происхождения.

В данной работе представлены результаты измерений общих концентраций облачных ядер конденсации при восьми различных значениях пересыщения, полученные на фоновой станции высотной мачты ZOTTO, расположенной в зоне бореальных лесов Центральной Сибири, в период с июля 2015 по июль 2016 года. Исследована сезонная изменчивость CCN-свойств частиц. Проанализирована возможность приближения спектров активации облачных ядер конденсации аналитической функцией. Приведен анализ возможности предсказания конденсационной активности частиц, исходя из полученных параметров приближения.

Работа выполнена при поддержке НИР СПбГУ № 116234388. Для измерений использовалось оборудование РЦ «Геомодель» Научного парка СПбГУ.

1. Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G. B., O'Dowd, C. D., Kulmala, M., Fuzzi, S., Reissell, A., and Andreae, M. O.: Flood or drought: How do aerosols affect precipitation, *Science*, 2008.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234388

Оценка точности расчета баланса коротковолновой радиации и температуры воздуха в модели ICON в безоблачных условиях.

Алексей А. Полюхов^{1,2}, Анна В. Гвоздева¹, Дарья А. Пискунова¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

aeromsu@gmail.com

В работе представлены результаты включения аэрозольной климатологии CAMS (Bozzo et al., 2020) мезомасштабную модель ICON (Giorgetta et al., 2018). Выявлены основных различия CAMS по сравнению с аэрозольной климатологией Tegen для станций AERONET (Holben et al., 1998) в Европе. Различия в содержании аэрозолей в климатологиях приводят к значительным изменениям в расчете баланса коротковолновой радиации и метеорологических элементов. Так изменение температуры может происходить в практических во всей тропосфере и может достигать -1°C до высот 350 гПа. При этом при увеличении высоты уменьшается чувствительность изменения температуры воздуха уменьшается от $0,9 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ на $100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ на 1000 гПа, до $0,6 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ на $100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ на 950 гПа и до $0,1 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ на $100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ на 850 гПа. При расчете на более длительные периоды заблаговременности роль выбора аэрозольной климатологии возрастает, особенно для ясных условий. Так, было получено, что разность приземной температуры воздуха между экспериментами Tegen (Tegen et al., 1997) и CAMS увеличивается на $0,6^{\circ}\text{C}$ за 100 часов прогноза. Ключевым результатом работы является оценка изменения точности расчета суммарной радиации и метеорологических элементов по сравнению с данными наземных измерений. Было получено, что выбор аэрозольной климатологии крайне важен для точности расчета баланса коротковолновой радиации у поверхности земли. Использование климатологии CAMS значительно уменьшает разность между расчетами и измерениями коротковолнового баланса по сравнению с климатологией Tanre (в среднем на $37,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$). Уменьшение разности выявлено и при сравнении с климатологией Tegen (в среднем на $4,7 \text{ Вт}/\text{м}^2$). Использование климатологии CAMS может улучшить точность прогноза приземной температуры воздуха до $0,3-0,4^{\circ}\text{C}$ для различных метеорологических станций по сравнению с климатологией Tanre и Tegen. Улучшение прогноза температуры отмечается также и на высоте 850 гПа (до $0,2^{\circ}\text{C}$), а также для количества осадков для территории ЕТР.

Вычисления на конфигурации ICON, предназначенного для оперативного прогноза погоды выполнены в рамках научно-исследовательской работы Росгидромета 125032004255-7. Анализ радиационных эффектов аэрозолей выполнен при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-77-01030.

1. Bozzo A. et al. An aerosol climatology for global models based on the tropospheric aerosol scheme in the Integrated Forecasting System of ECMWF //Geoscientific Model Development. – 2020. – Т. 13. – №. 3. – С. 1007-1034.
2. Holben B. N. et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization //Remote sensing of environment. – 1998. – Т. 66. – №. 1. – С. 1-16.
3. Tegen I. et al. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1997. – Т. 102. – №. D20. – С. 23895-23915
4. Giorgetta M. A. et al. ICON-A, the atmosphere component of the ICON earth system model: I. Model description //Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2018. – Т. 10. – №. 7. – С. 1613-1637.

Исследование проведено при поддержке:

1. "РНФ", грант 23-77-01030
2. "Росгидромет", грант 125032004255-7

Атмосферный аэрозоль и его радиационное воздействие при высоком альбедо поверхности по данным наземных измерений и моделирования

Артем Д. Голиков¹, Наталия Е. Чубарова¹, Александр А. Кирсанов², Николай А. Петров¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

a050504@ya.ru

Атмосферный аэрозоль оказывает заметное охлаждающее влияние на климатическую систему, что выражается в отрицательном знаке его радиационного воздействия (IPCC, 2021). В то же время известно, что в условиях высокого альбедо поверхности аэрозольное радиационное воздействие может существенно отличаться от оценок IPCC и даже менять знак.

Для изучения радиационных эффектов аэрозоля с помощью химико-транспортной модели COSMO-ART были проведены численные эксперименты для Московского региона с 24.02.2025 по 28.02.2025, когда наблюдалась преимущественно безоблачная погода, а альбедо поверхности было высоким ($A=0,68$) из-за снежного покрова. Результаты моделирования позволили воспроизвести как сам атмосферный аэрозоль и его приземные концентрации, так и его влияние на радиационные характеристики для указанных условий и для условий со стандартным для Москвы альбедо поверхности ($A=0,4$). Кроме этого, в анализе использовались результаты модельных расчетов автономной версии модели ECRAD (Hogan, Bozzo, 2018). Результаты моделирования массовых концентраций аэрозоля (PM10 и PM2.5) сравнивались с измерениями на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг». Результаты модельных экспериментов также сравнивались с данными радиационных измерений комплекса MSU-RAD формата BSRN в Метеорологической Обсерватории (МО) МГУ.

Приземные концентрации аэрозоля в условиях господства антициклональной погоды в этот период, по данным Мосэкомониторинга, возрастили и 28.02 были в 2-2,5 раза выше, чем 24.02. В некоторые часы 25.02 и ночью с 27.02 на 28.02 средние часовые концентрации превышали среднесуточную ПДК. Корреляционный анализ позволил выделить слабую обратную зависимость концентраций PM10 и PM2.5 от скорости ветра, высоты температурной инверсии и высоты пограничного слоя. Сопоставление с данными измерений выявило заметное завышение модельных приземных концентраций относительно измерений практически на всех пунктах наблюдений, что, вероятно, связано с неточной оценкой промышленных выбросов во входных данных модели. Отметим, что в эксперименте с повышенным альбедо поверхности ($A=0,7$) приземные концентрации аэрозоля оказались выше на 10-15% относительно эксперимента со стандартным альбедо поверхности ($A=0,4$), предположительно, из-за уменьшения высоты пограничного слоя за счет более слабого нагревания поверхности при более высоком альбедо.

Коротковолновый баланс на ВГА и НГА по данным COSMO-ART неплохо согласуется с расчетами в модели ECRAD и измерениями (в пределах 20-30 Вт/м²). Сопоставление компонент радиационного баланса с данными измерений у поверхности Земли выявило некоторые особенности. Суммарная радиация в COSMO-ART оказалась завышена примерно на 1-5% относительно данных измерений. Отраженная радиация в эксперименте с альбедо поверхности, равным 0,7, оказалась близка к измеренным значениям. Длинноволновая радиация оказалась несколько занижена из-за более низких модельных температур воздуха.

Радиационное воздействие московского городского аэрозоля в типичных для зимнего времени условиях (AOT \geq 0,08, альбедо поверхности - 0,4, высота Солнца - 20°) в коротковолновом диапазоне составляет примерно -0,5 Вт/м² на ВГА и около -6 Вт/м² на НГА. При альбедо поверхности, близком к 0,7, воздействие достигает +3 Вт/м² на ВГА и -3 Вт/м² на НГА. Таким образом, при высоком альбедо поверхности, согласно модельным оценкам, радиационное воздействие аэрозоля в коротковолновом диапазоне принимает заметные положительные значения.

СЕКЦИЯ 5. ОЗОНОСФЕРА – МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗЫ

Председатель: к.ф.-м.н. **Розанов Е.В.** («ОЗЛаб», СПбГУ, Санкт-Петербург,

Россия/World Radiation Center, Davos, Switzerland)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. **Смышляев С.П.** (РГГМУ, Санкт-Петербург, Россия)

Устные доклады

Влияние скоростей фотолиза на содержание озона в полярных регионах

Анастасия С. Иманова¹ , Евгений В. Розанов¹ , Владимир А. Зубов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

a.imanova@spbu.ru

В некоторых химико-климатических моделях существует проблема недооценки общего содержания озона в атмосфере над полярным регионом в Южном полушарии. Возможным решением является более точное моделирования процессов фотодиссоциации. В данном исследовании представлены результаты установки нового модуля расчета скоростей фотолиза Cloud-J v.8.0 в химико-климатическую модель SOCOL v.3.

Cloud-J v.8.0 - широкополосной алгоритм для расчета скоростей фотолиза в присутствии облачных и аэрозольных слоев, который позволяет моделировать глобальную фотохимию атмосферы, напрямую включая физические свойства рассеивающих и поглощающих частиц.

Результаты показывают, что установка Cloud-J v.8.0 повышает точность расчетов скоростей фотолиза и улучшает модельное представление годового цикла озона над южным полярным регионом.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986.

Влияние стратосферного вулканического извержения на климатическую систему в различных фоновых условиях

Маргарита А. Ткаченко^{1,2}, Евгений В. Розанов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Российский государственный гидрометеорологический университет

usa4eva.m@mail.ru

Представленное исследование освещает результаты численного моделирования воздействия супервулканического извержения на климатическую систему в условиях различных фоновых состояний. Данное извержение по своей мощности сопоставимо с историческим катализмом Тамборы 1815 года, который оказал значительное влияние на глобальный климат. Для проведения анализа была использована комплексная химико-климатическая модель SOCOL-MPIOM, позволяющая учитывать взаимосвязь между химическими и физическими процессами в атмосфере. Эксперименты проводились для трех временных срезов: современные условия и два сценария будущего климата согласно моделям SSP2-4.5 и SSP3-7.0. Методологический подход основывался на применении квазислучайной выборки с использованием последовательностей Соболя, что обеспечило оптимальное исследование параметрического пространства модели при минимизации вычислительных затрат.

Анализ полученных результатов демонстрирует усиление климатического эффекта супервулканического извержения в условиях более теплого климата конца XXI века. Это проявляется в более выраженном глобальном понижении температуры и значительном увеличении периода восстановления климатической системы в сравнении с современными условиями. Подобная интенсификация обусловлена комплексным взаимодействием радиационных и динамических процессов в атмосфере с измененным химическим составом.

Реакция озонового слоя на вулканическое воздействие характеризуется сложной пространственной структурой с выраженной широтной асимметрией. В высоких широтах наблюдается существенное уменьшение содержания озона, тогда как в тропических регионах регистрируется его увеличение. Данное явление объясняется модификацией атмосферной циркуляции и трансформацией фотохимических процессов формирования и разрушения озона под влиянием вулканических аэрозолей и измененного температурного режима.

Среди исследованных сценариев наиболее интенсивный аналог исторического "года без лета" прогнозируется при реализации сценария SSP3-7.0. Этот феномен, вероятно, обусловлен повышенными концентрациями метана и оксидов азота, характерными для данного сценария, которые существенно влияют на фотохимические процессы в атмосфере и усиливают радиационный эффект вулканических аэрозолей.

В сценариях будущего климата обнаруживается более сложная вертикальная структура температурных аномалий с выраженным контрастом между стратосферным потеплением и тропосферным охлаждением. Данная особенность указывает на интенсификацию взаимодействий между динамическими и фотохимическими процессами в условиях модифицированного химического состава атмосферы. Нарушение стратосферно-тропосферного обмена приводит к климатическим последствиям, затрагивающим широкий спектр атмосферных явлений.

Периоды восстановления озонового слоя значительно превышают временные масштабы температурной релаксации, что свидетельствует о значительном воздействии вулканического форсинга на химический состав атмосферы. Этот факт подчеркивает критическую важность учета химических обратных связей при комплексной оценке климатических последствий супервулканических извержений. Игнорирование данного аспекта может привести к существенной недооценке долгосрочных эффектов вулканической активности на глобальную климатическую систему.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986

Исследование изменений климата и состава атмосферы в Российской Арктике методом даунскэллинга

Георгий М. Неробелов^{1,2}, Владимир А. Зубов¹, Евгений В. Розанов¹

¹ Лаборатория Исследований Озонового слоя и Верхней Атмосферы, СПбГУ, Россия

² Лаборатория моделирования средней и верхней атмосферы, РГГМУ, Россия

akulishe95@mail.ru

За последние несколько десятилетий в Арктике наблюдаются значительные климатические изменения. Продолжающееся повышение температуры поверхности Земли ускорило таяние вечной мерзлоты и способствовало росту числа лесных пожаров. Кроме того, государственные программы, направленные на сокращение антропогенных выбросов некоторых загрязняющих веществ (например, NO_x, SO₂, CO и т. д.), в будущем могут привести к увеличению тропосферного озона (O₃), одного из самых вредных загрязнителей атмосферы. В будущем эти и другие последствия изменения климата в Арктике могут оказаться более значительными. Поэтому оценки изменений климата и состава атмосферы за ближайшие 100 лет в региональном масштабе (~1000 км) имеют сегодня большое значение. Результаты подобных оценок могут указать, какие регионы Земли будут больше всего затронуты будущими изменениями климата и антропогенной активностью.

Одним из наиболее перспективных подходов для таких оценок является даунскэллинг от глобальной модели системы Земли к региональной модели через задание граничных условий. Этот подход учитывает как влияние глобальных (например, дальний перенос загрязняющих веществ), так и локальных процессов (например, сложный рельеф местности, антропогенная активность и др.). В текущем исследовании модельная система, состоящая из глобальной модели земной системы SOCOLv4 и региональной модели химического состава тропосферы WRF-Chem, используется для оценки изменений климата и состава атмосферы в Российской Арктике в течение ближайших ~100 лет.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ 116234986.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986

Исследование эволюции озонового слоя Земли с помощью новой версии химико-климатической модели ИВМ РАН - РГГМУ

Сергей П. Смышляев¹, Андрей Р. Яковлев¹

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

smyshl@rshu.ru

Аннотация. Проведены численные эксперименты с помощью химико-климатической модели на основе модели INMCM60. Проанализирована эволюция озона в атмосфере.

Ключевые слова. Численные эксперименты, тропосферная химия, бромная химия, концентрация озона, общее содержание озона.

Основным методом данного исследования является численное моделирование атмосферных процессов. Изменения основных метеорологических параметров (температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, плотности воздуха и скорости ветра) описываются уравнениями термодинамики, сохранения водяного пара, состояния воздуха, неразрывности и движения атмосферы. Эти уравнения решаются численными методами. Неадиабатические процессы, связанные с солнечной радиацией, турбулентностью, конвекцией и влиянием подстилающей поверхности на атмосферу, учитываются посредством параметризации. Эволюция газовых примесей определяется с помощью уравнений их переноса, которые также решаются конечно-разностными методами; при этом для решения данной задачи определяются скорости химических реакций. Между динамической и химической частями модели происходит обмен расчётными данными, что позволяет учитывать влияние всех этих процессов друг на друга.

В данной работе использовалась химико-климатическая модель, основанная на модели ИВМ РАН версии 6 (INMCM60), которая содержит, помимо динамического и химического блоков, аэрозольный и океанический блоки. Обмен между динамическим и аэрозольным блоками происходит по аналогии обмена с химическим блоком. Обмен с океаническим блоком происходит только после того, как все 3 блока (динамический, химический и аэрозольный) провели расчёты за 1 шаг по времени. Также в этой модели можно менять разрешение по долготе и широте. В данной работе проведены эксперименты с 5^0 долготы и 4^0 широты (количество узлов в модели 72 по долготе и 45 по широте, шаг по времени – 7 минут 30 секунд) и с 2^0 долготы и 1.5^0 широты (количество узлов в модели 180 по долготе и 120 по широте, шаг по времени 2 минуты 75 секунд). По вертикали количество σ-уровней модели равно 73 (от 0 до 60 км или от поверхности до уровня 0.2 гПа), при этом результаты моделирования интерполируются в изобарическую систему координат на 26 стандартных изобарических поверхностей. Для океанического блока разрешение 1x0.5 (для версии 5x4) и 0.5x0.25 (для версии 2x1.5). Модель обновляет начальные данные через каждые 6 часов (4 раза в сутки).

С помощью данной модели были проведены численные эксперименты. В версии 5x4 проведены эксперимент без использования интерактива химия-атмосфера (учёт обратного влияния газовых примесей на атмосферные процессы) и эксперимент с использованием этого интерактива. Также проведены эксперименты с помощью модели 2x1.5 с интерактивом и без интерактива с разными вариантами химического блока: химия с тропосферными и бромными компонентами, химия с упором на тропосферные компоненты. Проанализированы изменения концентрации и общего содержания озона.

Результаты экспериментов также использовались в качестве начальных и граничных условий для моделирования с помощью модели WRF-chem для Санкт-Петербурга и Российского Севера.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Министерство науки и высшего образования Российской государственному гидрометеорологическому университету", грант FSZU-2023-0002

2. "Российский Научный Фонд", грант 24-17-00230
3. "Российский Научный Фонд", грант 23-77-30008

Моделирование Одновременного Изменения Стратосферного и Тропосферного Озона

Арина А. Окуличева¹ , Маргарита А. Усачева , Сергей П. Смышляев

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

smyshl@rshu.ru

Предметом исследования является содержание озона в тропосфере и стратосфере. Целью работы является анализ степени взаимного влияния стратосферного и тропосферного озона друг на друга. Рассматриваются физические и химические процессы, определяющие долгопериодную изменчивость содержания озона в тропосфере и стратосфере. Особое внимание обращается на влияние летучих органических компонентов на тропосферный и стратосферный озон.

Методом достижения цели является численное моделирование с использованием химико-климатических моделей, в которых варьируется степень учета тех или иных процессов, влияющих на содержание озона. Среди этих процессов главное внимание обращается на потоки углеводородов и окислов азота с поверхности. В численных экспериментах сначала рассматривается влияние только окисления метана на образование тропосферного озона и его связь со стратосферным озоном. Затем добавляется механизм окисления изопрена и связанных с ним газов, а далее и других летучих органических компонентов.

Моделирование доз УФ-радиации для выработки витамина "Д" в XXI веке.

Владимир А. Зубов^{1,2} , Евгений В. Розанов^{1,3} , Татьяна А. Егорова³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова

³ Физико-метеорологическая обсерватория/Мировой Радиационный Центр

v.a.zubov@spbu.ru

Модель климатической системы Земли *SOCOLv4* и модель для расчета радиационных потоков в атмосфере *FASTRT (UVSPEC)* были использованы для расчета изменений суточных доз ультрафиолетовой радиации, необходимой для выработки витамина «Д» (УФвД) в условиях изменений климата Земли и состояния атмосферного озона в XXI веке. В результате модельных экспериментов согласно жесткому (SSP5-8.5) сценарию роста концентраций парниковых газов проекта CMIP6 и сценарию WMO, предусматривающему снижение содержания озоноразрушающих веществ в атмосфере, установлено существенное (на 20-80%) уменьшение суточных доз УФвД с 2015-2024 по 2090-2099 годы в средних широтах обоих полушарий и их увеличение на 30-40% для некоторых территорий низких широт. Результаты экспериментов также позволили нам оценить относительный вклад изменений общего содержания озона, параметров облачности, и изменений альбедо подстилающей поверхности в соответствующее изменение суточных доз УФвД в течение XXI века.

Исследование проведено при поддержке:

"Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986

Современные наземные и спутниковые дистанционные методы определения содержания озона

Юрий М. Тимофеев¹ , Александр В. Поляков¹ , Яна А. Виролайнен¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

y.timofeev@spbu.ru

Озон является одной из важнейших газовых составляющих в атмосфере Земли. Его важность как поглотителя опасного УФ солнечного излучения, парникового газа и опасного газа в тропосфере, а также падение его содержания в 80-х годах прошлого столетия стимулировали создание глобальной системы мониторинга озона. В докладе проанализированы основные современные дистанционные наземные и спутниковые методы измерений вертикальных профилей (ВР) и общего содержания озона (ОСО) содержания озона. Рассмотрены их основные характеристики – случайные и систематические погрешности измерений, вертикальное и горизонтальное разрешения, области измерений, периодичность и т.д. Приведенные характеристики сопоставляются с современными международными требованиями к измерениям озона сформулированные в различных областях атмосферных наук – атмосферные приложения, физика атмосферы, сельскохозяйственная метеорология, глобальное численное прогнозирование погоды и мониторинг климата, прогноз погоды высокого разрешения, климатология, атмосферная химия и т.д.

**СЕКЦИЯ 6. РАДИАЦИОННАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ и РАДИАЦИОННЫЕ
АЛГОРИТМЫ в МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ и КЛИМАТА**

Председатель: д.ф.-м.н. **Журавлева Т.Б.** (ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия)

Сопредседатели: д.г.н. **Чубарова Н.Е.** (МГУ, Москва, Россия), к.ф-м.н. **Спорышев П.В.**

(ГГО им. А.И. Войкова, Санкт-Петербург, Россия)

Устные доклады

Воспроизведение атмосферной радиации различными облачными вычислительными алгоритмами в модели ECRAD

Николай А. Петров¹, Наталья Е. Чубарова¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

nial.03@mail.ru

Комплексные исследования качества воспроизведения атмосферной радиации с использованием различных конфигураций и вычислительных схем в радиационной модели ECRAD важны для улучшения радиационных блоков моделей численного прогноза погоды и климата. В работе представлен анализ результатов радиационных расчётов по автономной модели ECRAD [2] с использованием различных вычислительных схем в облачных условиях в сравнении с высокоточными измерениями радиационного комплекса RAD-MSU (BSRN) Метеорологической обсерватории Московского государственного университета [1].

Входные данные для расчётов были подготовлены для единой вертикальной сетки с использованием 137 уровней. Основные метеорологические переменные (в т.ч. доля облачности в слое и водосодержание) были взяты по данным реанализа ERA-5, аэрозольный состав атмосферы задавался по реанализу CAMS, основные парниковые газы - по климатологическим данным IFS Cycle 46R1. Временная дискретность для сравнений в облачных условиях выбрана равной одному часу для более аккуратных временных осреднений пространственной структуры облачности и соблюдения эргодичности. Расчёты в ECRAD проведены с использованием трёх алгоритмов (McICA, Tripleclouds и SPARTACUS) с применением различных настроек.

Результаты сравнений анализировались для разных диапазонов балла облаков, который был предварительно синхронизирован по расчётом и данным визуальных измерений в МО МГУ, а также отдельно для оптически плотного сплошного облачного покрова.

В неоднородных облачных условиях наблюдается в целом одинаковый характер распределения погрешностей для всех вычислительных алгоритмов. При этом максимальные погрешности отмечены для облачности баллом 5-7, при котором происходило существенное занижение коротковолнового баланса до 50-70 $\text{Вт}/\text{м}^2$. Для более высокого балла облачности (7-10) наблюдается максимальное завышение коротковолнового баланса до 20-40 $\text{Вт}/\text{м}^2$. Наблюдаемые различия, связаны прежде всего с неточностью воспроизведения прямой коротковолновой радиации в облачных алгоритмах. Длинноволновый баланс восстанавливается всеми облачными алгоритмами удовлетворительно, погрешность не превышает 10 $\text{Вт}/\text{м}^2$ для всех градаций балла облаков. В условиях оптически плотной сплошной облачности погрешности коротковолнового баланса почти для всех алгоритмов положительны, в длинноволновом спектре - отрицательны. Следует выделить важную проблему ненулевого расчёта прямой солнечной радиации в облачных алгоритмах при сплошном облачном покрове. Наилучшей конфигурацией для использования в расчётах плотной 10-балльной облачности по данным анализа является SPARTACUS с использованием двух облачных состояний («2reg») и с включением 3D эффектов. Дополнительно были оценены радиационные эффекты трёхмерной структуры облачности («3D»-«1D») и дополнительного облачного состояния («3reg»-«2reg») для алгоритма SPARTACUS.

Исследование проведено при поддержке гранта РНФ №25-27-00014.

- Chubarova N. E., Rozental V. A., Zhdanova E. Yu., Poliukhov A. A. New radiation complex at the Moscow State University Meteorological Observatory of the BSRN standard: methodological aspects and first measurement results. // Opt. Atmos. Oc., 2022. – 35 - P. 670-678.
- Hogan R.J. A flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model / R.J. Hogan, A.A. Bozzo // Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2018. – 10(8) - P. 1907-1929;

Исследование проведено при поддержке:

Особенности динамики компонент радиационного баланса в Москве по данным нового комплекса RAD-MSU стандарта BSRN

Дарья А. Пискунова¹, Наталья Е. Чубарова¹, Алексей А. Полюхов¹, Виктор А. Розенталь¹, Марина В. Шатунова^{1,2}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

piskunovada@my.msu.ru

Мониторинг радиационного баланса и его компонент необходим для оценки и прогнозирования изменений климата. В августе 2021 года в Метеорологической обсерватории (МО) МГУ были установлены высококачественные приборы фирмы Kipp&Zonen, рекомендованные для измерения на сети BSRN, и был образован комплекс RAD-MSU(BSRN) [Чубарова и др., 2022; Piskunova et al., 2024]. Приборы комплекса измеряют все компоненты радиационного баланса: восходящее и нисходящее коротковолновое и длинноволновое излучение, прямую и рассеянную коротковолновую радиацию, эритемную ультрафиолетовую радиацию и ультрафиолетовую радиацию области А с минутным разрешением. В ходе мониторинга была разработана система оценки критериев качества данных, создано программное обеспечение для автоматизированной обработки данных.

Анализируется динамика компонентов радиационного баланса в течение всего периода измерений для ясных и облачных условий с августа 2021 по март 2025 г. Рассмотрено влияние различных геофизических факторов на коротковолновое и длинноволновое излучение. Для коротковолнового баланса рассматривалось влияние альбедо поверхности, влагосодержания и облачности. Были произведены оценки величины облачного пропускания для суммарной радиации в зависимости от балла облачности отдельно для снежной и бесснежной поверхности. Для компонент длинноволнового баланса оценивались количественные характеристики связи с приземной температурой, баллом нижней и общей облачности и влагосодержанием.

Выявлено, что в период с ноября по март длинноволновый баланс преобладает по модулю над коротковолновым, что связано с низкой высотой Солнца, высоким альбедо поверхности и частой повторяемостью облачности высоких баллов.

Продолжен анализ условий наблюдения положительных значений длинноволнового баланса. Проведены численные эксперименты с моделью ICON, которые подтвердили возможность перехода значений длинноволнового баланса через ноль в наблюдаемых условиях адвекции теплого воздуха на снежную поверхность.

Анализируется влияние временного переноса аппаратуры на качество данных в связи с ремонтом МО МГУ. Проведены сравнения с данными стандартных актинометрических наблюдений в МО МГУ.

Литература

Чубарова Н. и др., Новый радиационный комплекс Метеорологической обсерватории МГУ стандарта BSRN: методические аспекты и первые результаты измерений // ОАО. 2022. Т. 35. № 8. С. 670–678.

Piskunova D. et al. Radiative Regime According to the New RAD-MSU(BSRN) Complex in Moscow: The Roles of Aerosol, Surface Albedo, and Sunshine Duration // Atmosphere (Basel). 2024. V. 15. № 2. P. 1–19.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский Научный Фонд", грант 25-27-00014

Результаты измерений длинноволновой радиации в обсерватории «Фоновая»

Татьяна К. Скляднева¹, Борис Д. Белан¹

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

tatyana@iao.ru

Одним из климатообразующих факторов является радиационный баланс подстилающей поверхности. Для анализа изменений климата важен мониторинг компонент радиационного баланса земной поверхности.

Сотрудниками ИОА СО РАН в обсерватории «Фоновая» ($56^{\circ}25'$ с.ш., $84^{\circ}04'$ в.д.) с ноября 2020 года ведутся измерения суммарной, отраженной коротковолновой радиации ($\lambda=0,3-2,800$ мкм), а также собственного излучения земной поверхности и встречного длинноволнового излучения атмосферы ($\lambda=4,5-42000$ мкм). Используется радиометр CNR4 производства Kipp&Zonen [1]. Прибор установлен на высоте 1,5 м и подключен в дифференциальном режиме к устройству многофункционального ввода-вывода.

В докладе анализируются результаты измерения длинноволновых составляющих радиационного баланса (встречного длинноволнового излучения атмосферы E_a и собственного излучения земной поверхности E_{π}) в фоновом районе Западной Сибири за период 2021-2024 гг.

Получен годовой ход E_a и E_{π} . Анализ месячных сумм E_a и E_{π} показал, что в их годовом ходе выделяется максимум в летние (июль-август) и минимум в зимние (январь-февраль) месяцы. Отношение месячных сумм E_{π} / E_a в течение года изменялось в пределах от 1,08 до 1,22.

Для каждого месяца определены экстремальные средние часовые значения и часовые суммы E_a и E_{π} .

Рассмотрен суточный ход E_a и E_{π} для каждого месяца. Амплитуда суточного хода меняется в течение года. Амплитуда суточного хода E_{π} значительна в летние месяцы ($DE_{\pi}=50 \div 70$ Вт/м²), зимой она меньше ($DE_{\pi}=7 \div 12$ Вт/м²). E_{π} имеет выраженный суточный ход с максимумом в 12–15 ч. Для E_a суточный ход выражен слабо.

Сделаны первые оценки изменения длинноволнового радиационного баланса B_{∂} и противоизлучения атмосферы от балла облачности. В холодный период при сплошной облачности, отрицательных температурах воздуха и почвы, наличие снежного покрова суточный ход B_{∂} слабо выражен, суточная амплитуда – 5 Вт/м² (10/10 баллов), 22 Вт/м² (ясно). При отсутствии снежного покрова суточная амплитуда B_{∂} изменяется в диапазоне 30 Вт/м² (10/10 баллов) – 70 Вт/м² (ясно). При сплошной облачности противоизлучение атмосферы увеличивается на 40–70 Вт/м².

Работа выполнена в рамках проекта «Российская система климатического мониторинга» (ВИП Г3). Для выполнения исследований использовалась инфраструктура ЦКП «Атмосфера».

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Скляднева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Методические аспекты и технические характеристики // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т.35. №9. С.759-765.

Анализ динамики вариаций космических лучей и обнаружение Форбуш-эффектов на основе метода машинного обучения

Богдана С. Мандрикова¹, Оксана В. Мандрикова¹

¹ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук

oksanam1@mail.ru

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) при помощи космической, авиационной и наземной техники, оснащённой различными видами регистрирующей аппаратуры, составляет важную основу изучения поверхности Земли. Нейтронные мониторы, являющиеся одним из средств ДЗЗ, представляют собой детекторы, регистрирующие интенсивность вариаций космических лучей. Данные о вариациях космических лучей в настоящее время активно используются в фундаментальных исследованиях области солнечно-земной физики и прикладных задачах прогнозирования различных природных явлений и событий [1, 2]. Актуальным направлением исследований, в частности, является оперативный мониторинг волновых процессов, связанных с приходом к Земле высокоскоростных потоков солнечного ветра, связанных с корональными выбросами масс, предшествующих началу геомагнитных бурь, способных привести к радиационной опасности для космонавтов, экипажей и пассажиров высотных самолётов, а также потере спутников и выходу из строя космической и наземной техники [2-4]. Поэтому методы, направленные на своевременное обнаружение аномальных проявлений в вариациях космических лучей, имеют особую практическую значимость.

В работе исследуется новый метод анализа вариаций космических лучей и обнаружения Форбуш-эффектов, основанный на сочетании методов машинного обучения с элементами теории статистических решений [5]. Основу метода составляют построенные авторами когнитивные правила выбора решения о состоянии данных, основанные на отображении данных в вейвлет-пространство и позволяющие в автоматическом режиме получить близкие к оптимальным оценки характеристик исследуемого природного процесса. Предлагаемые в работе численные алгоритмы реализации метода включают средства адаптации и позволяют в интерактивном режиме обнаруживать и оценивать аномальные изменения в данных о вариациях космических лучей, свидетельствующие о возникновении Форбуш-эффектов. Исследование показало эффективность разработанного метода и алгоритмов для обнаружения аномальных изменений в скорости прихода космических лучей на Землю, наблюдаемых за несколько часов до начала умеренных и экстремальных геомагнитных бурь (уровней G3-G5) в период 2024-2025 гг.

Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим поддержку станций нейтронных мониторов (<https://www.nmdb.eu>, <http://spaceweather.izmiran.ru>) и данных о состоянии межпланетной среды (<http://ipg.geospace.ru>, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>) и магнитосфера (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>), которые использовались в работе.

Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

Литература:

1. Гетманов В.Г., Гвишиани А.Д. и др. Ранняя диагностика геомагнитных бурь на основе наблюдений систем космического мониторинга // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 1. С. 59-67
2. Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии, 2014, №. 3 (6). С. 3-13.
3. Демьянов В.В., Ясюкович Ю.В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 2. С. 30-52.
4. Белов А.В., Виллорези Д. и др. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44. № 4. С. 502-510.
5. Mandrikova O., Mandrikova B. Hybrid model of natural time series with neural network component and adaptive nonlinear scheme: application for anomaly detection. Mathematics. 2024. 12. 1079. <https://doi.org/10.3390/math12071079>

Радиационный форсинг углекислого газа и метана в тропосфере региона Нижнего Поволжья

Константин Фирсов¹, Татьяна Чеснокова², Алексей Размолов¹

¹ Волгоградский государственный университет

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

fkm.volsu@mail.ru

Согласно международным отчетам по изменениям климата IPCC концентрация CO_2 и CH_4 в атмосфере за последние 50 лет выросла примерно на четверть. Рост концентрации парниковых газов, таких как CO_2 , CH_4 , и др., вызывает увеличение температуры атмосферы и подстилающей поверхности и, как следствие, более сильное испарение влаги, вызывая положительный форсинг, а процессы формирования облаков и аэрозолей приводят к изменению альбедо Земли (отрицательный форсинг). Суммарное радиационное воздействие от всех выше перечисленных факторов оценивается в отчете IPCC в диапазоне 0,6-2,4 $\text{Вт}/\text{м}^2$. Согласно данным работы [1] форсинг CH_4 за индустриальный период (с 1750 до 2011 г.) занижен примерно на 25% в результатах, полученных в IPCC[2]. Одним из факторов, приводящих к этой неопределенности, является неточный учет перекрывания полос CH_4 с колебательно-вращательными полосами паров воды, с континуумом H_2O и взаимодействия с облаками. Водяной пар — консервативная примесь, его концентрация зависит от температуры воздуха и типа подстилающей поверхности, поэтому возрастание концентрации паров воды в атмосфере обусловлено положительными обратными связями. Это в свою очередь разгоняет парниковый эффект. Поэтому, исследование связей мгновенного радиационного форсинга CO_2 и CH_4 с общим влагосодержанием в атмосфере позволит уточнить роль CO_2 и CH_4 в парниковом эффекте.

Были рассчитаны длинноволновые потоки излучения: восходящие на верхней границе и нисходящие на нижней границе безоблачной атмосферы для типичных метеорологических условий региона Нижнего Поволжья. Использовались данные ECMWF ERA-5 – European Reanalysis для летних условий 2021 г. Этот год был выбран вследствие того, что среднее содержание паров воды в вертикальном столбе атмосферы летом ($\text{WH}_2\text{O} = 2,74 \text{ г}/\text{см}^2$) было выше среднего за другие годы. Для моделирования использовалась выборка, состоящая из 368 вертикальных профилей (4 реализации за сутки на протяжении трех летних месяцев). Радиационный форсинг CO_2 и CH_4 вычислялся как разность потоков излучения при значениях концентрации этих газов, соответствующих 1973 г. и настоящему времени. Результаты моделирования показали, что с ростом влажности вклад CO_2 в радиационное воздействие на поверхность Земли уменьшается, что приводит к меньшему нагреву поверхности, однако нагрев атмосферы увеличивается. Усиление парникового эффекта за счет увеличения концентрации CO_2 в условиях высокой влажности приводит к еще большему нагреву атмосферы. Выяснилось, что при высокой влажности окно прозрачности атмосферы закрывается, т.е. доминирующую роль в этих процессах играет континуум водяного пара, а не селективное поглощение в полосах H_2O .

Выявлено, что в отличие от CO_2 связь между радиационным форсингом CH_4 и общим влагосодержанием в тропосфере незначительна, и с ростом концентрации паров воды нагрев атмосферы за счет увеличения концентрации CH_4 за последние 50 лет не возрастает. При этом радиационный форсинг CH_4 в тропосфере находился в диапазоне 0,1-0,2 $\text{Вт}/\text{м}^2$, тогда как форсинг CO_2 был 0,8-1,4 $\text{Вт}/\text{м}^2$ [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН

1. M. Etminan, G. Myhre, E.J. Highwood, and K.P. Shine.// Geophys. Res. Lett. 2016. V.43. N.24. P.12,614-12,623

2. The IPCC working group 1 (2013) assessment report "Climate Change 2013, The Physical Science Basis <https://ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

3. K.M. Firsov, T.Yu. Chesnokova, and A.A. Razmолов // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. V.37, N.6. P.689-697

Оценка воздействия выбросов чёрного углерода на радиационный баланс и другие климатические параметры для территории России.

Сергей В. Кострыкин^{1,2,3}, Илья С. Ильин², Алексей В. Гусев², Вероника А. Гинзбург², Алексей Ю. Черненков^{1,3}

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук

² Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля

³ Институт географии Российской академии наук

s_kostr@mail.ru

С помощью модели Земной системы INMCM6 исследуется отклик климатической системы на выбросы в атмосферу чёрного углерода (ЧУ) за период 2010-2021гг для территории России. В данную модель включён аэрозольный блок, который описывает эволюцию чёрного углерода в атмосфере и континентальном снеге, в том числе перенос-диффузию, микрофизические процессы «старения», седиментации, вымывания аэрозольных частиц осадками из атмосферы и талой водой из снега. Прямое радиационное воздействие аэрозольных частиц в атмосфере оценивается на основе их предписанных оптических свойств, а в снеге - на основе вычисления альbedo снега, параметризованного в зависимости от свойств снега и концентрации аэрозольных частиц содержащихся в нём. В модели не учитываются непрямое воздействие аэрозольных частиц ЧУ на облака. В качестве выбросов ЧУ в атмосферу используются глобальные данные CEDS (антропогенный источник) и GFED4 (источник от сжигания биомассы).

Результаты модельных экспериментов верифицированы для средних глобальных и пространственных характеристик ЧУ на основе данных мультимодельного эксперимента AEROCOM3, реанализов CAMS и MERRA, а также данных наблюдений EBAS по аэрозольному коэффициенту поглощения на станциях, расположенных в Арктике, и вертикальных профилях ЧУ, полученных при самолётном зондировании атмосферы во время кампании HIPPO.

С помощью данной модели получены и проанализированы данные для территории РФ для интегрального трансграничного переноса ЧУ, радиационного воздействия от чёрного углерода, содержащегося в атмосфере и снеге и других параметров. Среднегодовой радиационный баланс на верхней границе атмосфере над территорией РФ увеличился на 0.28 Вт/м² за счёт при учёте чёрного углерода, содержащегося в воздухе. Среднегодовой радиационный баланс на поверхности суши увеличился на 2.3 Вт/м² при учёте чёрного углерода, содержащегося в снеге. Данная величина радиационного воздействия согласуется с работой (Flanner et al., 2007) в которой приводится оценка для радиационного форсинга от потемнения снега из-за чёрного углерода и минеральной пыли для Евразии в весенний период 3.9 Вт/м².

Указанные изменения в радиационном балансе приводят к дополнительному нагреву поверхности и увеличению скорости снеготаяния. На основе данных модельных экспериментов, сделана оценка климатического отклика от антропогенных и естественных выбросов чёрного углерода в атмосферу по отдельности. Для этого из результатов эксперимента с полными выбросами вычитались результаты соответствующих экспериментов с эмиссией от специфического источника. В частности получено, что антропогенные и природные выбросы ЧУ вносят примерно одинаковый вклад в увеличение среднегодовой приземной температуры воздуха, порядка 0.2 °С. Максимальный температурный отклик на выбросы чёрного углерода наблюдается в январе и составляет 0.7 и 1°C для антропогенных и природных выбросов соответственно. В апреле альbedo снега уменьшается на величину 0.03, а скорость снеготаяния увеличивается на 20% от своего среднегодового значения для случая антропогенных выбросов. Данные изменения величин согласуются с результатами, полученными другими авторами (Bellouin, Boucher, 2010).

Исследование выполнено в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 г. №3240-р «Об утверждении инновационного проекта «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»

Современное состояние актинометрических наблюдений на метеорологической сети Росгидромета

Анна Е. Ерохина¹, Александр Н. Махоткин¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»), Россия

aktinom@mail.ru

Актинометрические наблюдения, выполняемые на метеорологической сети, предназначены для изучения радиационного режима, определяющие в значительной степени климат территорий РФ. Сетевые приземные актинометрические наблюдения включают в себя определение комплекса взаимосвязанных между собой характеристик достигающих земной поверхности солнечного излучения и теплового излучения естественных земных объектов, а также ряда параметров состояния атмосферы. ФГБУ «ГГО» является научно-методическим центром Росгидромета по руководству актинометрическими наблюдениями.

Основными программами наблюдений на актинометрической сети являются: – срочные актинометрические наблюдения (дискретные наблюдения в 6 актинометрических сроков по среднесолнечному времени); – регистрация радиационного баланса и его составляющих – непрерывные наблюдения для определения часовых, суточных и месячных сумм составляющих радиационного баланса или отдельных видов коротковолновой радиации. Также проводится определение суточных сумм суммарной радиации путем интегрирования. В настоящее время значительная часть станций Росгидромета оснащена современным актинометрическим оборудованием: – автоматизированные актинометрические комплексы для проведения непрерывных наблюдений за всеми составляющими радиационного баланса; – модернизированными комплектами оборудования для проведения срочных наблюдений; – комплектами оборудования для регистрации суммарной радиации (в том числе в составе автоматизированных метеорологических комплексов). Замена актинометрического оборудования на наблюдательной сети Росгидромета проводилась по нескольким программам: ФЦП «Геофизика», проекты «Росгидромет-1», «Росгидромет-2», «Модернизация и развития гидрометеорологической сети наблюдений за состоянием окружающей среды в Арктической зоне Российской Федерации на 2021-2024 гг.», программа социально-экономического развития Донецкой Народной Республики, Луганской Народной Республики, Запорожской области и Херсонской области, а также за счёт средств региональных метеорологических центров (УГМС). Всего за период 2010–2023 гг. на актинометрической сети было установлено 174 комплекта нового актинометрического оборудования, что позволило переоснастить 155 станций, выполняющих актинометрические наблюдения, причем на 43-х из них наблюдения были восстановлены после длительных перерывов. Внедрение на сети автоматизированных комплексов, обеспечивающих непрерывное получение информации о радиационном балансе и его составляющих, потребовало пересмотра системы сбора, обработки, контроля и архивации актинометрической информации. Новое программное обеспечение (ПО) для обработки данных актинометрических измерений АРМ «SONE-8», было разработано взамен используемому ранее на сети. В новое ПО были внесены изменения, связанные с файловой структурой исходных данных, которые формируются в виде минутных измерений контроллером, сопряженным непосредственно с актинометрическими датчиками или СПО. Помимо стандартных видов измерений, АРМ «SONE-8» позволяет провести обработку и контроль длинноволновой и ультрафиолетовой радиации. По результатам опытной эксплуатации АРМ «SONE-8» на отдельных станциях, выполняющих наблюдения различными комплексами, ПО внедрено на наблюдательную сеть Росгидромета, что обеспечивает повышение качества представляемой актинометрической информации и сохранение ее в расширенном формате и объеме.

Постерная сессия

Пространственно-временная изменчивость максимальных значений солнечной радиации в Балтийском регионе

Елена А. Самукова¹, Анатолий В. Цветков¹, Анна А. Барташевич¹

¹ Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Войкова

e.samukova@mail.ru

Исследование пространственно-временной изменчивости солнечной радиации, поступающей на земную поверхность, имеет особое значение в связи с изменением климата.

В предлагаемой работе представлены результаты анализа максимальных суточных сумм суммарной (Q) и рассеянной (D) солнечной радиации, измеряемой на 30 астронометрических станциях стран Балтийского региона: Дании, Германии, Латвии, Польши, России, Финляндии, Швеции, Эстонии. Для определения максимальных значений солнечной радиации, поступающей на земную поверхность, использовались ряды суммарной радиации за 1964-2023 гг. и рассеянной радиации за 1988-2023 гг. из архива Мирового центра радиационных данных (МЦРД).

Распределение максимальных значений суммарной радиации по годам для большинства станций региона показывает наличие двух периодов с наибольшей повторяемостью: с 1964 года до начала 1980-х и с 2000-х годов до настоящего времени.

Для количественной оценки временных изменений максимальных значений солнечной радиации использовались статистические методы анализа: определялись 95%-вероятностные уровни отношений максимальных суточных значений Q и D к астрономически возможным значениям солнечной радиации на верхней границе атмосферы. Вероятностные уровни максимальных значений радиации рассчитывались для двух периодов: 1964-2000 и 1964-2023 гг. для суммарной радиации, 1988-2004 и 1988-2023 гг. для рассеянной радиации.

Сравнительный анализ полученных для двух периодов оценок максимальных значений солнечной радиации показывает их увеличение с конца 1990-х – начала 2000-х годов на большинстве астронометрических станций региона. Наиболее заметное увеличение максимальных значений Q отмечается в ноябре-марте – на 3-6%, на станциях в Польше и на юге Швеции до 8%. В октябре-марте максимальные значения D увеличились на 5-10%, на некоторых станциях в Финляндии до 15%. В мае-сентябре на станциях региона существенных изменений максимальных значений Q и D не наблюдается, незначительное увеличение составляет 1-3%.

Представленные результаты согласуются с проведёнными ранее исследованиями тенденций изменения средних за месяц значений солнечной радиации, измеряемой на астронометрических станциях Европы, и дополняют их. Отмеченные изменения в поступлении солнечной радиации на земную поверхность позволяют сделать вывод о том, что её увеличение в последние 20-25 лет связано не только с ростом прямой солнечной радиации, но также и с увеличением рассеянной составляющей.

Полученные оценки максимальных значений суммарной и рассеянной радиации используются в качестве климатически обусловленных пределов при проведении контроля качества астронометрической информации, пропступающей в МЦРД. Накопленные в МЦРД в последнее время данные о солнечной радиации позволили уточнить используемые критерии качества.

Оценка гелиоэнергетических ресурсов Дальневосточного федерального округа

Валентина А. Задворных¹, Валентина В. Стадник¹, Вероника А. Говоркова¹

¹ Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Войкова

sun@main.mgo.rssi.ru

Главная особенность дальневосточной энергетики - изолированность территорий. Альтернативные источники энергии (ветер, солнце, биомасса, геотермальная и местные виды топлива) позволяют решать проблему зон децентрализованного электроснабжения, которые составляют более 75% территории Дальнего Востока.

Солнечная радиация - ключевой возобновляемый ресурс региона, валовый потенциал которого составляет 813 200 млн т.у.т./год, технический потенциал - 3224,4 млн т.у.т./год, экономический потенциал - 0,132 млн т.у.т./год. Однако не во всех регионах округа этот потенциал активно реализуется.

Согласно районированию территории России по природному потенциалу гелиоэнергетических ресурсов южные районы Дальневосточного федерального округа относятся к самому приоритетному району. В западных районах Приморского края годовое количество поступающей на земную поверхность суммарной радиации составляет 1450 кВт·ч/м², что является максимальным для территории России и составляет 70-75% от возможной радиации. Продолжительность солнечного сияния - до 2850 часов за год. Количество энергии, которое может вырабатывать фотоэлектрическая батарея при КПД фотогенератора 15%, составляет 250-290 кВт·ч/м², при использовании систем слежения за Солнцем удельная выработка возрастает до 350-380 кВт·ч/м².

В настоящее время в Забайкалье ввели в эксплуатацию Борзинскую СЭС мощностью 60 МВт, что повысило долю возобновляемой энергетики района до 9%.

Интенсивное развитие гелиоэнергетики происходит в Бурятии, в конце 2024 года введены в эксплуатацию Новобичурская (52 МВт) и Джидинская (50 МВт) СЭС. Доля общей установленной мощности в энергосистеме района увеличена до 13%.

Лидером по использованию солнечной энергии на Дальнем Востоке является Якутия, где в весенне-летний период, особенно в апреле и мае, месячные суммы суммарной радиации в ее северных районах так же высоки, как на северном Кавказе и в Астраханской области - более 165 кВт·ч/м². Здесь действуют 32 солнечные станции. В 2015 году в поселке Батагай введена в эксплуатацию солнечная электрическая станция с установленной мощностью 1 МВт - одна из самых крупных на Дальнем Востоке и единственная такой мощности за Полярным кругом. Батагайская СЭС внесена в Книгу рекордов, как самая северная станция.

Оценка влияния изменения климата на выработку энергии солнечными электростанциями с помощью глобальных климатических моделей CMIP6 показала, что в течение XXI века в Дальневосточном федеральном округе ожидается формирование обширных летних положительных аномалий солнечной радиации, что благоприятно для работы солнечных установок.

В настоящее время и в близкой перспективе наиболее реальным направлением практического использования солнечной энергии является теплоснабжение. Влияние изменений солнечной радиации и температуры воздуха положительно скажется на выработке тепловой энергии плоскими солнечными коллекторами. Тенденция к увеличению выработки тепловой энергии подтверждается уточненными расчетами поступления солнечной радиации и температуры воздуха в соответствии со CMIP6. В северных и северо-восточных районах Дальневосточного федерального округа рост температуры перекроет прогнозируемое уменьшение солнечной радиации, и использование солнечных коллекторов в режиме горячего водоснабжения может стать рентабельным.

Оценка методов расчета солнечного излучения в негидростатической мезомасштабной модели ICON в условиях неоднородной облачности

Марина В. Шатунова¹, Юлия О. Шувалова¹, Наталья Е. Чубарова^{2,1}

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

shatunova@mecom.ru

Методы расчета излучения, применяемые в современных моделях численного прогноза погоды (ЧПП) и изменений климата, позволяют учесть неоднородность свойств облачности в пределах ячейки вычислительной сетки. Одним из таких методов является стохастический метод McICA¹ (Monte-Carlo Independent Column Approximation), получивший широкое распространение в моделях ЧПП ввиду своей вычислительной эффективности. Наряду с этим в последнее время в передовых прогностических моделях IFS ECMWF и ICON используется метод TripleClouds^{2,3}.

Негидростатическая мезомасштабная модель ICON применяется для оперативных прогнозов погоды в ряде национальных метеослужб Европы, и с 2024 г. - в Гидрометцентре России. Рассчитываемые в модели ICON с использованием двух методов, McICA и TripleClouds, оптические толщины облачности и суммарная радиация оценивались по спутниковым данным CERES и MODIS для отдельных дней в теплый период 2021 г., для которых, помимо спутниковых данных, имеются наблюдения по радиационным (станция сети BSRN в Линденберге) и облачными (станция сети CLOUDNET в Линденберге) характеристикам.

В среднем расчеты с использованием McICA и TripleClouds дали близкие результаты. Однако, через 10-12 часов интегрирования модели пространственные распределения прогностических величин водосодержания, оптической толщины, количества облаков и суммарной радиации, полученные двумя методами, имеют существенные различия. Среднеквадратическое отклонение разности между двумя вариантами расчетов составили, например, для водосодержания - 100 г/м², для оптической толщины капельной облачности - 8 и порядка 100 Вт/м² для суммарной радиации.

¹doi: 10.1029/2002JD003322

²doi: 10.1029/2018MS001364

³doi: 10.1175/2007JCLI1940.1

Исследование проведено при поддержке:

1. "Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации", грант НИОКР 125032004255-7

Учет неопределенности радиационно-облачных характеристик и параметров схемы описания эффектов орографии подсеточного масштаба в ансамблевом прогнозировании на основе модели ICON

Елена Д. Астахова¹, Анастасия Ю. Бундель¹, Дмитрий Ю. Алферов¹, Марина В. Шатунова¹, Инна А. Розинкина¹

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

elena_ast_hmc@mail.ru

Ансамблевые методы широко используются в численных прогнозах погоды, позволяя дать априорную оценку их качества и предоставить пользователям расширенный объем прогностической продукции, включая вероятностную. Ансамблевая система должна описывать неопределенности прогнозов, связанные как с неточностью начальных и граничных данных для численных моделей, так и с несовершенством самих моделей. В настоящей работе рассмотрены методы учета несовершенства модели атмосферы в ансамблевом прогнозе и выполнены оценки влияния возмущения различных параметров схем описания процессов подсеточных масштабов, включая радиационно-облачное взаимодействие и эффекты подсеточной орографии, на средние по ансамблю прогнозы, разброс прогнозов в ансамбле, вероятностные характеристики прогнозов. Численные эксперименты выполнялись с помощью региональной ансамблевой системы высокого разрешения ICON-Ru2-EPS [1], основанной на модели ICON с шагом сетки около 2 км, что позволяло явным образом описать глубокую конвекцию. Для верификации результатов применялся пакет METplus [2]. Использовался метод случайных возмущений параметров. Проводился анализ источников неопределенности результатов расчетов радиационных потоков и влияния подсеточной орографии в модели ICON. Оценка эффектов возмущения различных параметров выполнялась как на отдельных тестовых случаях, так и для более длинной выборки. Результаты показали недостаточную эффективность метода случайных возмущений параметров схем, описывающих процессы подсеточного масштаба, и необходимость привлечения дополнительных методов учета несовершенства модели для ансамблевой системы ICON-Ru2-EPS.

Исследование проведено в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета АААА-А20-120021890120-8 и АААА-А20-120021490079-3 (темы 1.1.4 и 1.1.3 на 2020-2024 гг.) и темы с регистрационным номером 125032004255-7 Проекта 1.1 на 2025–2030 годы.

1. Е.Д. Астахова, А.Ю. Бундель, Д.Ю. Алферов, И.А. Розинкина, Г.С. Ривин. О применении ансамблевых методов в краткосрочных региональных прогнозах // // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 1 (395). С. 6-36. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-6-36>
2. Brown B. et al. The Model Evaluation Tools (MET): More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2021. Vol. 102. P. E782-E807. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0093.1>

Изменчивость радиационных потоков над Мировым океаном в XX веке по стандартизованным визуальным наблюдениям общего балла облачности

Марина Александрова¹ , Гулев Сергей¹

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

marina@sail.msk.ru

В данной работе анализируется возможность использования данных визуальных наблюдений общего балла облачности с судов из архива данных ICOADS для реконструкции долгопериодных (с начала XX века) временных рядов радиационных потоков над Мировым океаном. Данные из архива ICOADS предоставляют самые длинные ряды наблюдений метеорологических величин над Мировым океаном. Однако облачность из этого архива характеризуется пространственно-временной неоднородностью выборки, а также систематическими ошибками в первой половине 20-го века, связанными с изменениями в практике наблюдений и системах кодирования в конце 1940-х - начале 1950-х годов. Для получения однородных стандартизованных временных рядов общего балла облачности мы разработали несколько алгоритмов коррекции, учитывающих систематические ошибки и неоднородность выборки. Эти алгоритмы основаны на детальном анализе данных наблюдений и судовых журналов в начале XX века и разработке аналитического распределения вероятностей общего балла облачности по октам.

Полученные однородные стандартизованные временные ряды общего балла облачности использовались для расчета потоков коротковолновой и длинноволновой радиации за период с 1900 года. Для использования параметризаций коротковолновой радиации была разработана методика, которая позволяет избежать влияния неравномерного распределения данных на суточном и сезонном временных масштабах. Также мы разработали схему для вычисления радиационных потоков из вероятностных распределений облачного покрова. В результате мы получили однородные глобальные временные ряды радиационных потоков, охватывающие период с 1900 года, которые были использованы для оценки линейных трендов в наиболее хорошо обеспеченных данными районах Мирового океана. Так, в Северной Атлантике выявлено увеличение облачного покрова и связанные с ним тенденции к уменьшению длинноволновой радиации. В регионе индийского муссона обнаружены тенденции к увеличению общего балла облачности и уменьшению потока коротковолновой радиации.

Динамика потребности в отоплении для различных городов России на основе климатических данных

Виктория А. Фалалеева¹, Сергей А. Докукин¹, Александр С. Гинзбург¹, Ия Н. Белова¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

victory@ifaran.ru

Радиационный форсинг оказывает значимое влияние на температурный режим, что напрямую определяет энергетическую потребность в отоплении зданий. Ключевым индикатором для оценки этой потребности служит показатель градус-суток отопительного сезона (HDD – heating degree days), рассчитываемый как сумма отклонений среднесуточной температуры от базового уровня 18°C за отопительный период [1].

В исследовании проведен сравнительный анализ трендов HDD, рассчитанных по двум параметрам: приземная температура воздуха (традиционный подход); физиологически эквивалентная температура (PET) – комплексный показатель, учитывающий температуру, влажность и скорость ветра. На основе климатических данных [2] за 1977-2019 гг. рассчитаны HDD для 29 городов России, расположенных в различных климатических зонах. Скорость изменения потребности в отоплении оценена через линейные тренды HDD(°C/год).

Наибольшие скорости снижения HDD (10-16°C/год) зафиксированы в городах Европейской части России (Москва, Санкт-Петербург), что связано с усилением потепления в умеренных широтах. Также наблюдается выраженная динамика HDD (10-12°C/год) для городов Дальнего Востока с умеренным муссонным климатом (Благовещенск, Хабаровск). Средние значения (6-9°C/год) соответствуют Восточной Сибири и Забайкалью с резко-континентальным климатом (Иркутск, Чита). Минимальные темпы (1-5°C/год) характерны для юга Западной Сибири с континентальным климатом (Омск, Новосибирск).

Для ряда городов выявлена тенденция к пересечению трендов HDD, что указывает на возможное снижение потребности в отоплении на единицу площади к 2060 г. в данных регионах относительно других городов. Учет микроклиматических факторов (PET) усиливает негативный тренд HDD на 10-20% по сравнению с традиционным методом, что подчеркивает важность комплексного подхода к оценке энергопотребления.

Работа поддержана Госзаданием № 125021001827-3 «Анализ и моделирование динамики экологических процессов в условиях меняющегося климата».

1. Belova I.N. et al 2018 Energy Procedia 149 373-379

2. Konstantinov P. I. et al. North Eurasian Thermal Comfort Indices Dataset (NETCID): New gridded database for the biometeorological studies. - Environ. Res. Lett., 2022, 1708500; https://figshare.com/articles/dataset/Thermal_comfort_indices_derived_from_ERA-Interim_reanalysis_for_Northern_Eurasia/12629861.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Госзадание", грант 125021001827-3

Многолетние изменения коротковолновых составляющих радиационного баланса земной поверхности по данным актинометрических наблюдений в регионах России

Валентина А. Задворных¹ , Елена И. Хлебникова¹

¹ Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Вoeйкова

sun@main.mgo.rssi.ru

Наряду с данными о радиационных потоках на верхней границе атмосферы, получаемыми в рамках спутниковых программ наблюдений, для анализа изменений климата принципиальное значение имеет слежение за различными компонентами радиационного баланса земной поверхности. Структура временной изменчивости приходящей радиации весьма сложна и содержит большой вклад долгопериодных колебаний, обусловленных как антропогенными, так и естественными причинами.

В работе рассматриваются современные региональные особенности изменения основных составляющих радиационного баланса земной поверхности (прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации) с учетом данных наблюдений за 1961-2020гг. Кроме того, представлены результаты сопутствующего анализа климатических изменений характеристик облачного покрова на территории России.

В настоящее время актинометрическая сеть Росгидромета насчитывает в своем составе более 160 пунктов наблюдений, для которых установлены три типа программ: непрерывные наблюдения (регистрация) радиационных потоков (33 станции), срочные наблюдения (76 станций), а также сокращенная программа наблюдений за суммарной радиацией с помощью интеграторов (92 станции). Действующая система регулярного мониторинга составляющих радиационного баланса земной поверхности опирается на результаты наблюдений по программе срочных наблюдений.

За последние двадцать лет общее число станций с полной программой актинометрических наблюдений варьировалось, хотя формально и не очень значительно. Однако из-за произвольного изменения программ наблюдений, которое производилось без согласования с климатологами, многие ряды оказались прерванными. В начале периода наметилась тенденция сокращения программ срочных наблюдений с частичной их заменой на наблюдения с помощью регистраторов. Впоследствии, из-за нехватки приборов, вновь стал происходить переход на срочные наблюдения, причем это коснулось и станций с достаточно длинными рядами наблюдений с помощью регистраторов.

Отмеченные структурные особенности актинометрической сети, происходящая модернизация и постепенный переход к использованию автоматизированных комплексов делают актуальным рассмотрение вопроса о возможности расширения информационной основы мониторинга. Проведенный анализ многолетних изменений прямой, рассеянной и суммарной радиации (месячные и сезонные суммы) показал, что несмотря на известные систематические отклонения и срочные наблюдения, и результаты непрерывной регистрации в целом обеспечивают воспроизведение многолетних изменений рассматриваемых составляющих радиационного баланса земной поверхности на территории России.

**СЕКЦИЯ 7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН, МАКРОЦИРКУЛЯЦИЯ и
ДИНАМИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ в АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ
ПЛАНЕТ**

Председатель: д.ф.-м.н. Гаврилов Н.М. (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. Коваль А.В. (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия), д.т.н.

Кулешов Ю.В. (ВКА, Санкт-Петербург, Россия)

Устные доклады

Тренды межгодовой изменчивости волновой активности планетарных волн в средней атмосфере

Ксения А. Диденко^{1,2}, Андрей В. Коваль^{2,3}, Татьяна С. Ермакова^{3,2}

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина

² Санкт-Петербургский государственный университет

³ Российский государственный гидрометеорологический университет

didenko.xenia@yandex.ru

С использованием данных реанализа JRA-55 проведены оценки трендов изменчивости волновой активности планетарных волн за период с 1980 по 2021 г. На первом этапе волновая активность исследовалась в рамках классического подхода. В этом случае была проанализирована вертикальная составляющая трехмерного потока волновой активности, рассчитанная с использованием подхода Пламба. Вертикальная составляющая была усреднена по трем широтно-долготным секторам Северного полушария для месяцев с декабря по март, построены временные ряды и оценена значимость обнаруженных трендов. Статистические оценки рассчитанных трендов показали увеличение восходящей из тропосферы в стратосферу волновой активности в январе и марте над Дальним Востоком России. Межгодовое уменьшение восходящей компоненты потока наблюдается только в декабре над европейской частью России, Европой и Ближним Востоком.

Кроме классического подхода волновая активность исследовалась как изменение потенциальной энстрофии во времени или как изменение во времени квадрата потенциальной завихренности Эртеля. В данном случае анализировалось межгодовое изменение волновой активности отдельных планетарных волн, в частности стационарной планетарной волны с зональным волновым числом 1 и 2. Изменения волновой активности рассчитывались для уровня 30 км и также усреднялись для декабря, января, февраля и марта. Получено, что статистически значимый тренд на увеличение потока волновой активности стационарной планетарной волны с зональным волновым числом 1 во времени наблюдается в декабре. Тренд значим с вероятностью 90%. Статистически значимый тренд с вероятностью 80% получен для изменения волновой активности стационарной планетарной волны с зональным волновым числом 2 во времени в декабре и марте. При этом в декабре волновая активность ослабляется, а в марте – увеличивается.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 25-47-00122

Активность гравитационных волн в марсианской атмосфере по данным эксперимента по солнечному просвечиванию ACS с борта аппарата ExoMars/TGO

Екатерина Д. Стариченко¹, Денис А. Беляев¹, Александр Медведев², Анна А. Федорова¹, Олег И. Кораблев¹, Александр Трохимовский¹

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

² Институт Макса Планка по исследованию солнечной системы, Германия

starichenko.ed@phystech.edu

Внутренние гравитационные волны (ГВ) - распространение волновых колебаний в атмосфере, возникающих вследствие смещения равновесия между силой тяжести и силой Архимеда (плавучести). ГВ переносят энергию и импульс, влияя на общую динамику атмосферы планеты. В нашей работе мы рассматриваем параметры ГВ [1] и их высотное распределение в атмосфере Марса. ГВ выявляются из высотных профилей температуры, полученных из эксперимента по солнечному просвечиванию, выполняемым российским комплексом спектрометров АЦС (ACS - Atmospheric Chemistry Suite) [2] на борту аппарата Trace Gas Orbiter (TGO). В эксперименте исследуются такие параметры, как амплитуда, потенциальная энергия и ускорение ГВ. Наблюдается симметричное распределение активности волн в сезоны равноденствий на Марсе, а также смещение максимума активности в зимнее полушарие в периоды солнцестояний. Максимум ускорения ГВ совпадает с зонами слабого зонального ветра на краях сезонных зональных потоков, смоделированных с помощью модели MAOAM Martian general circulation model (MGCM) [3]. Кроме того, увеличенная активность ГВ наблюдалась во время глобальной пылевой бури (в MY34) на Марсе на больших высотах в регионе северных полярных широт и на низких высотах южных полярных широт [4].

ACS находится на орбитальном аппарате TGO, который является частью европейско-российской миссии ExoMars 2016. Он состоит из трех спектрометров ближнего - NIR (0.73-1.6 мкм), среднего - MIR (2.3-4.2 мкм) и теплового - TIRVIM (1.7-17 мкм) инфракрасного диапазона. В данной работе используются данные каналов MIR и NIR. Оба прибора позволяют восстанавливать вертикальные профили температуры и плотности по спектрам пропускания в полосах поглощения углекислого газа CO₂ в диапазоне высот - 10-180 км (MIR) [5], 10-100 км (NIR) [6]. Представленный объем данных охватывает наблюдения за три Марсианских года (MY) с середины MY34 (апрель 2018) по конец MY37 (ноябрь 2024). Объем данных насчитывает около 1100 сеансов солнечных затмений для канала MIR и около 12300 сеансов для NIR.

Исследование выполняется при поддержке гранта РНФ № 25-22-00494, <https://rscf.ru/project/25-22-00494/>

[1] Starichenko E. et al., 2021. Gravity wave activity in the Martian atmosphere at altitudes 20-160 km from ACS/TGO occultation measurements. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2021JE006899. DOI: 10.1029/2021JE006899

[2] Koralev O., Montmessin F., and ACS Team, 2018. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter. *Space Sci. Rev.*, 214:7. DOI 10.1007/s11214-017-0437-6.

[3] Medvedev, A. S., & Hartogh, P. (2007). Winter polar warmings and the meridional transport on Mars simulated with a general circulation model. *Icarus*, 186, 97- 110.

[4] Starichenko E. D., Medvedev A. S., Belyaev D. A., et al. Climatology of gravity wave activity based on two Martian years from ACS/TGO observations. *Astronomy&Astrophysics*, 683, A206 (2024). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348685>

[5] Belyaev D. et al., 2022. Thermal Structure of the Middle and Upper Atmosphere of Mars from ACS/TGO CO₂ Spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 127, e2022JE007286. doi: 10.1029/2022JE007286

[6] Fedorova A. et al., 2022. A two-Martian year survey of the water vapor saturation state on Mars based on ACS NIR/TGO occultations. Submitted to Journal of Geophysical Research: Planets. 128, e2022JE007348. doi: 10.1029/2022JE007348

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 25-22-00494

Эффекты солнечных вспышек и геомагнитной супербури 10 мая 2024 года в вариациях доплеровского сдвига частоты ионосферного сигнала, геомагнитного поля и теллурического тока

Назыф М. Салихов¹, Галина Д. Пак¹, Серик М. Нуракынов¹

¹ ТОО «Институт ионосферы» Аэрокосмический комитет Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности, Республика Казахстан

N1_Nazyf@mail.ru

10 мая 2024 года произошла одна из сильнейших геомагнитных бурь за последние 67 лет. В течение двух суток был зарегистрирован самый высокий уровень геомагнитной активности G5. Буря началась после прихода к Земле облака космической плазмы, которое было выброшено из Солнца в результате нескольких вспышек 8 мая интенсивностью от X1.0 до M8.6 (www.xrus.ru). Во время таких вспышек интенсивность рентгеновского и жёсткого ультрафиолетового излучения Солнца резко возрастает. Это приводит к росту электронной концентрации в ионосфере. Вспышка X1.0, которая произошла в интервале времени 01:33 - 01:48 UTC с максимумом в 01:41 UTC, вызвала отчетливый отклик в доплеровском сдвиге частоты (ДСЧ) ионосферного сигнала. Амплитуда возмущения в ДСЧ составила порядка 4,5 Гц, а длительность около 800 секунд. Затем возмущения были последовательно зарегистрированы в магнитном поле индукционным магнитным датчиком (IMS-008) и далее феррозондовом магнитометром (LEMI-008), и наблюдались только на солнечной стороне Земли. Измерения показали, что отклик в геомагнитном поле на солнечную вспышку X1.0 был инициирован модуляцией электрических токов в ионосфере в результате изменения электронной концентрации. При взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой орбитальные и наземные магнитные обсерватории зарегистрировали магнитный импульс, характеризующий внезапное начало бури (Storm Sudden Commencement - SSC). SSC было зарегистрировано 10 мая 2024 года в 17:06 UT. Магнитная буря сразу превысила уровень G4 и усилилась до максимального уровня G5, а максимальное изменение Dst-индекса достигло значений - 412 нТ. Планетарный индекс геомагнитной возмущённости на протяжении 10 - 11 мая достиг наивысших значений Kp=9. Спад геомагнитной активности, начавшийся 12 мая, завершился к полудню 13 мая. Хорошо выраженная реакция ионосферы в ДСЧ началась практически одновременно с ростом Kp и Dst индексов. Высокое временное разрешение индукционного магнитометра IMS-008 (частота дискретизации $f=66,6$ Гц) позволили определить время внезапного начала геомагнитной бури как 17:05:31 UT. На 14 секунд позже внезапное начало было зарегистрировано феррозондовым магнитометром LEMI-008. Возмущения в вариациях теллурического тока возникли на 2-3 секунды позже, чем на записях индукционного магнитометра. На примере солнечной вспышки X1.0 (08.05.2024) и экстремальной магнитной бури уровня G5 (10.05.2024) прослежены временные особенности и отличия направленности процессов взаимодействия магнитосферы, ионосферы и теллурических токов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант номер AP19678127 "Развитие методов и средств геофизического мониторинга для исследования процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера в сейсмоопасном регионе Северного Тянь-Шаня".

Исследование проведено при поддержке:

1. "Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан", грант AP19678127

Исследование явления «мезосферный бор» по наблюдениям камер всего неба и спутников

Олеся В. Тышук¹, Игорь И. Колтовской¹, Семен В. Николашкин¹

¹ Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

oleSmile@mail.ru

Понимание механизмов движения воздушных масс очень важно и остается актуальной задачей в эпоху глобального изменения климата. Изредка, среди обычных волновых возмущений в мезосфере, можно наблюдать проявление явно выделяющегося фронта волны, который отделяет часть пространства, уже вовлеченнную в волновой процесс, от области, в которой колебания еще не возникли. Этому волновому явлению дали название – мезосферный бор. Мезосферный бор, представляющий собой усиление атмосферных гравитационных волн, может влиять на потоки импульса и энергии, и тем самым воздействовать на тепловой режим и состав на всех уровнях атмосферы. В данном исследовании рассмотрены два события мезосферного бора, зарегистрированных над полигоном Маймага (63.0° сш, 129.5° вд), расположенным в центральной части Якутии. Регистрация этого явления осуществлялась в свечении ночного неба камер всего неба (эмиссия излучения гидроксила OH и атомарного кислорода [OI]). Первое событие наблюдалось 19 ноября 2017 г., второе событие – 30 января 2022 г. Были рассчитаны фазовая скорость распространения бора, его направление движения, длина последовательных внутренних гравитационных волн, период волны, время и продолжительность явления. Зная скорость распространения бора и время необходимое на его образование, был вычислен примерный радиус области формирования бора. Прохождение мезосферного бора сопровождается внезапным скачком температуры в структуре мезосферных инверсионных слоев (MIL). В связи с чем, в предполагаемой области формирования бора были проанализированы данные температур верхней атмосферы спутниковых наблюдений Aura Microwave Limb Sounder (MLS) и мгновенной температуры области MLT (мезосфера и нижняя термосфера) прибора Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) на борту спутника TIMED. На основе температурных данных, построены вертикальные профили квадрата частоты Брента-Вяйсяля для проверки статической устойчивости MIL, который является благоприятным условием для мезосферного бора. Бор, в эмиссии свечения камеры всего неба, может быть темным, либо светлым, в зависимости от высоты его прохождения. Обобщив все полученные данные с изображений и спутников, выполнен приблизительный расчет высоты распространения мезосферного бора. После чего, для нахождения возможных источников генерации мезосферного бора были изучены синоптические карты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) и глобальные карты ветров и погодных условий по данным NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Рассмотрены движения воздушных потоков на различных геопотенциальных высотах (700 гПа, 500 гПа, 250 гПа, 70 гПа). Во время обоих событий, управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды объявляли штормовое предупреждение из-за сильных циклонов в предполагаемой области формирования бора.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук", Республика Саха (Якутия)", грант 25-27-20119

Пространственная и временная изменчивость нелинейных волновых процессов во время ВСП различных типов

Андрей В. Коваль¹, Ксения А. Диденко², Татьяна С. Ермакова³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина

³ Российский государственный гидрометеорологический университет

a.v.koval@spbu.ru

Работа посвящена исследованию внутренней динамики внезапных стратосферных потеплений (ВСП) различных типов с точки зрения расчета в явном виде нелинейных взаимодействий планетарных волн между собой и со средним потоком, а также волновой активности. Волновые процессы анализировались с использованием подхода, заключающегося в исследовании изменчивости возмущенной потенциальной энстрофии. Такой подход позволяет детально изучать эволюцию взаимодействия волн со средним потоком, оценивать вклад дивергенции и адвекции потока потенциальной энстрофии в изменение волновой активности. С использованием доступных климатологических описаний наблюдавшихся в последние десятилетия ВСП и обработки данных гидрометеорологических параметров из базы данных реанализа MERRA-2 были отобраны и разделены на группы ВСП, сопровождавшиеся смещением и расщеплением стратосферного полярного вихря. Отдельно была выделена группа ВСП с нетипичным положением и формой стратосферного полярного вихря, не попадающие в первые две группы. Во время таких ВСП наблюдалось не только смещение стратосферного полярного вихря, но и его вытягивание над территорией Северного полушария, и непродолжительное расщепление. В результате для каждой группы были отобраны по пять событий ВСП. Для каждого исследуемого события были рассчитаны слагаемые в уравнении баланса возмущенной потенциальной энстрофии для стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2). Анализ большого количества ВСП различных типов показал, что нелинейные межволновые взаимодействия, являющиеся слагаемыми третьего порядка малости и, обычно, не учитывающиеся в исследованиях вносят значительный вклад в изменения волновой активности до и во время развития ВСП со смещением стратосферного полярного вихря. Аналогичный вклад слагаемых отвечающих за взаимодействия между СПВ был получен для ВСП из последней группы с нетипичным положением и формой стратосферного полярного вихря. Межволновые взаимодействия наблюдаются до начала ВСП в основном выше 45 км и севернее 50° с.ш. Взаимодействие СПВ1 со средним потоком максимально за 1-3 недели до ВСП с расщеплением стратосферного полярного вихря, а СПВ2 – в течение недели перед ВСП. При этом, во время и за 5 дней до ВСП волновая активность СПВ2 соразмерна или превышает волновую активность СПВ1. Обменные слагаемые СПВ1 и СПВ2 со средним потоком усиливаются за 1-3 недели до ВСП со смещением стратосферного полярного вихря. Анализ слагаемых, отвечающих за взаимодействие волн со средним потоком во время развития ВСП из третьей группы, показал, что развитие этих ВСП сопровождается вариациями обменных слагаемых характерными как для ВСП с расщеплением, так и со смещением стратосферного полярного вихря. Дальнейшая статистическая обработка полученных результатов может способствовать выявлению предикторов формирования ВСП. Исследование поддержано Санкт-Петербургским государственным университетом (грант 116234986).

Эволюция спектров вторичных акусто-гравитационных волн вблизи критических уровней в атмосфере

Николай М. Гаврилов¹, Сергей П. Кшевецкий^{2,1,3}, Андрей В. Коваль¹, Юлия А. Курдяева⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

⁴ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина

n.gavrilov@spbu.ru

С помощью нелинейной численной модели высокого разрешения проводится моделирование для изучения распространения акусто-гравитационных волн (АГВ) из тропосферы в верхние слои атмосферы. В этом моделировании учитываются фоновые профили ветра, содержащие критические уровни, на которых горизонтальная скорость ветра становится равной горизонтальной фазовой скорости АГВ. Согласно традиционным линейным теориям атмосферных волн, вблизи критических уровней вертикальная длина волн приближается к нулю, что приводит к сильной диссипации АГВ, распространяющихся из тропосферы, и не позволяет им достичь верхних слоёв атмосферы. Наше численное моделирование проводится с использованием источников волн в виде возмущений вертикальной скорости, распространяющихся вдоль поверхности Земли. Струйные течения в атмосфере аппроксимируются гауссовыми профилями среднего зонального ветра с максимумами на высотах 110 км и 50 км. Расчёты показывают, что амплитуды АГВ значительно уменьшаются выше высотных критических уровней. Для критических уровней на высотах от 30 до 70 км часть волновой энергии может проникать через них и распространяться дальше в верхние слои атмосферы. В нелинейной модели вблизи критического уровня происходит усиленное образование вторичных волновых режимов.

Выполнен анализ спектров волновых полей вблизи критических уровней и на удалении от них. Обнаружено, что неустойчивость волн около критических уровней интенсифицирует переход энергии от первичных АГВ, распространяющихся от приземных источников. Это увеличивает высоту спектральных пиков на длинах волн в 1/2 и 1/3 горизонтальной длины первичной АГВ. Поэтому на высотах более 100 км преобладают режимы с более короткими горизонтальными длины волн, чем длина волн первичной АГВ, причем амплитуды этих вторичных волн могут превышать амплитуды первичной АГВ при отсутствии критических уровней в средней атмосфере.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986
2. "Российский научный фонд", грант 25-17-00166

Численное моделирование солитонного разрушения внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере

Николай М. Гаврилов¹, Сергей П. Кшевецкий^{2,1,3}, Юлия А. Курдяева⁴, Сергей Н. Куличков³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

⁴ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина

n.gavrilov@spbu.ru

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) в атмосфере могут разрушаться, образуя вторичные волны более мелких масштабов, вплоть до образования волновой турбулентности. Экспериментально проследить процесс разрушения волн в деталях затруднительно, поскольку волны обычно распространяются на большие расстояния. Масштабы образующихся вторичных волн могут отличаться от масштаба первичной волны на порядки. Для проверки численных исследований распространения и разрушения волн полезно иметь аналитические оценки для условий разрушения, времени разрушения, масштабов образующихся вторичных волн. Сочетание аналитического и численного подходов позволяет лучше изучить процесс распространения и разрушения волн, в деталях.

Выполнено прямое численное решение гидродинамических уравнений для атмосферного газа с применением модели высокого разрешения. Сравнение результатов этих численных расчетов с результатами анализа выведенного уравнения КДВ-Бюргерса для атмосферных слоев показало достаточно хорошее соответствие. Предпочтительные высоты, вблизи которых ВГВ могут разрушаться, примерно соответствуют высотам изменения знака горизонтальной скорости в волне. Параметры мелкомасштабных уединенных вторичных волн-солитонов, образующихся в расчетах по полным гидродинамическим уравнениям, хорошо согласуются с оценками, основанными на анализе уравнения КДВ-Бюргерса. Последнее уравнение не описывает распространение вторичных волн с течением времени в другие атмосферные слои, а также колебания, наклоны и деформацию слоистой структуры, создаваемых первичной волной, в силу приближений, использованных при выводе уравнения КДВ-Бюргерса.

Длинные ВГВ имеют слоистую структуру: возмущения температуры, плотности, а также горизонтальная скорость чередуют знаки с высотой. Показано, что разрушение волн проявляется себя внутри слоев, создаваемых первичными волнами. В слоях появляются мелкомасштабные уединенные вторичные волны. При этом каждая из образующихся вторичных волн проявляется себя в нескольких слоях. Слоистая структура длинной ВГВ долго сохраняется, несмотря на образование вторичных волн, но слои могут волнообразно колебаться, изменять толщину и наклоняться. Выполнены расчеты разрушения волн, основанные на численном решении полных гидродинамических уравнений для атмосферного газа. Сравнение результатов этих численных расчетов с результатами анализа системы гидродинамических уравнений на основе выведенного для слоев уравнения КДВ-Бюргерса показало, что модельное уравнение в целом правильно описывает динамику волн. Параметры мелкомасштабных уединенных вторичных волн, образующихся в расчетах с полными гидродинамическими уравнениями, хорошо согласуются с оценками, основанными на анализе уравнения КДВ-Бюргерса.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986
2. "Российский научный фонд", грант 25-17-00166

Климатология внезапных стратосферных потеплений на высотах 30 и 40 км по методу экстремумов скорости изменения температуры и ветра.

Матвей М. Ефимов¹ , Николай М. Гаврилов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

matvey.efimov.96@mail.ru

Целью данной работы является сравнение характеристик внезапных стратосферных потеплений (ВСП) на высотах 30 и 40 км за период с 1958-2017 г. г., найденных методом экстремумов скорости изменения (МЭСИ) температуры и ветра по данным японского 55-летнего метеорологического реанализа JRA-55. Время начала и окончания ВСП идентифицировано по моментам нулевых значений второй производной температуры и зональной скорости усредненных по широтам выше 60° с. ш. на высотах 30 км и 40 км, которые соответствуют экстремальным значениям скорости изменения этих параметров. Предложена модифицированная классификации типов ВСП по характеристикам, полученным методом МЭСИ на высотах 30 и 40 км. Описаны критерии для определения сильных и умеренных ВСП, которые могут рассматриваться как аналоги мажорных и минорных потеплений в международной классификации ВСП. Метод ЭСИ обладает повышенной чувствительностью и позволил выделить дополнительный класс слабых ВСП. Отдельно рассмотрены раннезимние стратосферные потепления, происходящие поздней осенью или в начале зимы (ноябрь-декабрь). За 59-летний период обнаружено на высоте 30 км 140 и на высоте 40 км 146 среднезимних ВСП (в среднем по 2-3 события в год). Количество событий ВСП, и типы одного события ВСП на разных высотах могут отличаться. Моменты максимальной скорости роста температуры опережают в среднем на сутки моменты наиболее быстрого убывания зонального ветра в начале ВСП. События ВСП на высоте 40 км в среднем интенсивнее чем на высоте 30 км и скоротечней. Подтверждено, что развитию ВСП всегда предшествуют увеличения меридионального потока тепла, направленного в сторону Северного полюса, которые могут способствовать нагреванию полярной стратосферы и развитию ВСП.

Исследование проведено при поддержке:

1. "СПбГУ", грант 116234986
2. "РНФ", грант 25-47-00122

Внутренние гравитационные волны вблизи мезопаузы по наблюдениям ночных эмиссий гидроксила в Звенигороде.

Андрей А. Попов¹, Николай М. Гаврилов¹, Владимир И. Перминов², Николай Н. Перцев²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

andrew.popovix@gmail.com

Метод цифровых разностных фильтров применен к анализу данных спектральных наблюдений вращательной температуры колебательно-возбужденного гидроксила OH(6-2) на высотах 85 - 90 км на Звенигородской научной станции ИФА РАН (56° с.ш., 37° в.д.) в период с 2000-2023 гг. Исследованы сезонные изменения среднемесячных значений вращательной температуры и дисперсий вариаций с периодами 0.7 - 11 ч., которые могут быть связаны с внутренними гравитационными волнами в области мезопаузы.

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. Для оценок в настоящей работе использованы данные измерений вращательной температуры гидроксила на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы РАН (56° с.ш., 37° в.д.), полученные с помощью спектрографа СП-50 с цифровой записью спектра в области 800 - 1000 нм [1]. Поле зрения спектральной аппаратуры составляет 9° с зенитным углом наклона центральной оси прибора 53° в северном направлении. Измерения проводятся в безоблачные ночи. Для получения необходимого отношения сигнал/шум, время накопления для одной регистрации спектра составляет 10 мин. Спектр гидроксильных эмиссий представляет собой совокупность инфракрасных колебательно-вращательных полос, которые позволяют определять вращательную температуру молекул OH.

Для выделения мезомасштабных вариаций характеристик ночных свечений применен метод разностной цифровой частотной фильтрации [2,3]. В качестве исходных данных берутся регистрации характеристик ночного свечения в моменты времени t_i , которые усредняются прибором за время накопления δt . Для оценки месячных стандартных отклонений δ_f мезомасштабных вариаций используется численная фильтрация путем определения разностей между регистрируемыми значениями, отстоящими на временные интервалы Δt .

Одной из причин мезомасштабных вариаций ночных свечений могут быть ВГВ, распространяющиеся в светящемся слое верхней атмосферы. Поляризационные соотношения теории атмосферных ВГВ [4] позволяют получить следующие связи амплитуд волновых вариаций горизонтальной скорости U и потенциальной волновой энергии E_p с мезомасштабной дисперсией и средним значением температуры.

Список источников

1. Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю. Излучение верхней атмосферы- индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
2. Popov A. A., Gavrilov N. M., Perminov V. I., Pertsev N. N., Medvedeva I. V. Multi-year observations of mesoscale variances of hydroxyl nightglow near the mesopause at Tomy and Zvenigorod // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2020. V. 205. P. 105311. doi : [10.1016/j.jastp.2020.105311](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105311).
3. Popov, A.A., Gavrilov, N.M., Andreev, A.B., Pogoreltsev, A.I., 2018. Interannual dynamics in intensity of mesoscale hydroxyl nightglow variations over Almaty. Solar-Terrestrial Physics 4(2), 63-68, DOI: 10.12737/stp-42201810. © 2018

4. Gossard E.E., Hooke W.H. Waves in the atmosphere. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam-Oxford-New York, 1975.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант 116234986
2. "Российский научный Фонд", грант 25-17-00166

Результаты расчетов газодинамической модели общей циркуляции атмосферы Земли

Игорь В. Мингалев¹ , Екатерина А. Федотова¹ , Константин Г. Орлов¹ , Виктор С. Мингалев¹

¹ Полярный геофизический институт Кольского научного центра Российской академии наук

iv-mingalev@yandex.ru

В докладе обсуждаются результаты численного моделирования, полученные с помощью газодинамической модели общей циркуляции атмосферы Земли, созданной в Полярном геофизическом институте. Проводится анализ образования вихревых течений разных масштабов, вертикального переноса на разных высотах, а также механизмов генерации внутренних гравитационных волн и их распространения. Все расчеты были в диапазоне высот 0–80 км с полноценным учетом радиационного нагрева-выхолаживания воздуха, процессов образования облаков и взаимодействия с поверхностью Земли и с шагом расчётной сетки по горизонту 15/64 градуса.

Особенности динамики стратосферы Арктики в зимний сезон 2024-2025 г.

Павел Н. Варгин^{1,2,3}

¹ Центральная Аэрологическая Обсерватория

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

³ Российский государственный гидрометеорологический университет

p_vargin@mail.ru

Первая половина зимнего сезона 2024-2025 г. в стратосфере Арктики характеризовалась устойчивым сильным стратосферным полярным вихрем, сравнимым с наблюдавшимися в наиболее холодные сезоны (1996-97, 2010-11, 2015-16 гг.) и 2019-2020 г., сезон с рекордным разрушением озонового слоя за все годы наблюдений. В результате низких температур в Арктике в феврале 2025 г. сформировались полярные стратосферные облака (ПСО) I типа, необходимые для начала в весенний период активного разрушения озонового слоя, «объём» которых стал максимальным (~160 млн. куб. км) за все годы наблюдений, превысив на ~30% значения февраля 2020 г. Столь низкие температуры полярной стратосферы были обусловлены заниженным распространением волновой активности из тропосферы, особенно с конца января до начала февраля, когда в течение примерно недели в нижней стратосфере Арктики температура снизилась ниже -83°C, позволив сформироваться на несколько дней ПСО II типа (с максимальным «объемом» ~75 млн. куб. км), состоящих из ледяных частиц и образующихся обычно только в Антарктике. Общее содержание озона (ОСО) в Арктике при этом достигло минимальных значений. В конце февраля 2025 г. в результате усиления распространения потоков волновой активности из тропосферы преимущественно над северо-востоком Евразии началось ослабление среднезонального ветра (с ~60 до ~25 м/с) и повышение температуры полярной стратосферы, что соответствует минорному внезапному стратосферному потеплению (ВСП). При этом над севером Канады сформировалась область с отражением волновой активности из стратосферы в тропосферу, из которой в течение нескольких дней в верхней тропосфере наблюдалось распространение потоков волновой активности в восточном направлении над Северной Атлантикой к Европе. В результате главного ВСП (ставшее и ранним финальным) в начале марта 2025 г., связанного с усилением Алеутского антициклона и смещением вихря к Евразии (т.е. усилением волны с зональным числом 1), сопровождалось усиленным распространением волновой активности над двумя регионами: северо-востока Евразии и Западной Европы. Минорное и главное / финальное ВСП предотвратили сильное разрушение озонового слоя весной, которое могло превысить рекордные значения 2020 г. В период главного ВСП над северо-западом России и Скандинавией сформировалась область с низким ОСО и минимальными значениями по данным спутникового прибора OMI 6 марта 2025 г. над Хельсинки - 204 единиц Добсона (е.Д.), Санкт-Петербургом - 221 е.Д., Москвой - 242 е.Д. (при этом 220 е.Д. считается границей озоновой аномалии в Антарктике). Сильно заниженные значения ОСО подтверждаются данными реанализа ERA5, измерениями спутникового прибора OMPS, наземными наблюдениями. Предварительные оценки показывают, что формирование области пониженного ОСО было связано со стратосферным полярным вихрем с низким ОСО, а также с антициклоном в тропосфере с повышенной тропопаузой и поступлением воздушных масс с пониженным озоном из средних широт вдоль западной периферии антициклона.

Исследование проведено при поддержке:

1. "РНФ", грант 24-17-00230

Аппроксимация данных температуры атмосферы с использованием гармоник Россби и двухстратегического адаптивного алгоритма пчелиной колонии

Вера И. Сивцева¹, Василий В. Григорьев¹

¹ Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова

verasivtseva@gmail.com

Ключевые слова: волны Россби, метод пчелиной колонии, спутниковые данные, Aura (MLS)

В данной работе представлена методология аппроксимации данных температуры атмосферы с использованием гармоник Россби на основе адаптивного алгоритма искусственной пчелиной колонии (TSaABC) с жестким пороговым отсечением. Алгоритм разработан для решения сложных задач оптимизации, связанных с нелинейными пространственно-временными моделями, описывающими динамику крупномасштабных волновых процессов. Предложенный подход позволяет эффективно выделять значимые компоненты из большого словаря возможных гармоник, обеспечивая одновременно высокую точность восстановления данных и их разреженность.

Рассмотренные в работе волны Россби играют ключевую роль в динамике атмосферы, поскольку они являются основным механизмом передачи энергии и импульса между различными уровнями атмосферы. Особенно важны эти волны в зимнем стратосферном регионе, где они способствуют развитию внезапных стратосферных потеплений и участвуют в формировании меридиональной циркуляции. Для анализа этих процессов использовались спутниковые данные с инструментов EOS MLS на борту аппарата Aura, обеспечивающие высокое вертикальное и временное разрешение. Были выбраны данные температуры в диапазоне широт 58°–68°N на высоте около 80 км, что соответствует области максимального проявления волновой активности.

Методология исследования заключается в формулировке обратной задачи, в которой минимизируется функционал, состоящий из двух частей: невязки между моделью и данными наблюдений (в терминах L2-нормы), и штрафа за количество используемых гармоник (в терминах L1-нормы). Это позволяет находить минимальное число значимых гармоник, которые достаточно точно описывают наблюдаемую температурную структуру. Для решения этой задачи был применён двухстратегический адаптивный алгоритм TSaABC, который сочетает в себе механизмы глубокой эксплуатации и широкой эксплорации пространства решений. Важным дополнением к алгоритму стало использование жёсткого порогового отсечения (Hard Thresholding), позволяющего исключать малозначимые гармоники в ходе оптимизации и снижать размерность задачи.

Численные эксперименты показали, что предложенный метод достигает относительной ошибки порядка 12%, что является приемлемым результатом при наличии коротковолновых возмущений, таких как внутренние гравитационные волны. Также было установлено, что алгоритм быстро сходится, благодаря комбинации двух стратегий поиска и адаптивному выбору наиболее эффективных направлений оптимизации. Полученные аппроксимирующие функции позволили визуализировать пространственно-временное распределение температурных аномалий, вызванных Россби-волнами.

Представленная методика может быть использована для улучшения прогнозирования климатических и погодных явлений, а также для анализа волновой динамики в атмосферах других планет. Перспективным направлением дальнейших исследований является расширение модели на трёхмерный случай и интеграция дополнительных параметров атмосферы, таких как ветер и давление, для более полного описания динамических процессов.

Динамическое и радиационное разрушение стратосферного полярного вихря весной

Татьяна С. Ермакова^{1,2} , Ксения А. Диденко^{1,3} , Андрей В. Коваль^{1,2} , Елена Н. Савенкова²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Российский государственный гидрометеорологический университет

³ Институт земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина

taalika@mail.ru

Разрушение стратосферного полярного вихря весной и переход стратосферы на летний режим сказываются на процессах и явлениях в соседних слоях атмосферы. Исследования последних лет подтверждают, что этот переход осуществляется неодинаково. В зависимости от скорости смены режима ветра на разных высотах его можно разделить на: радиационный переход, то есть естественный, который происходит под воздействием солнечной радиации, и на динамический, который происходит при мощном внезапном стратосферном потеплении в конце зимы – начале весны. Исследование влияния разных типов переходов не только на саму стратосферу, но и на тропосферу, поможет лучше понять происходящие процессы и взаимодействие между слоями атмосферы. Анализ распределения метеорологических характеристик (среднезональной компоненты скорости ветра и температуры) по времени и вертикали, а также приземной среднесуточной температуры в разных городах выше 60°с.ш. показывает, что при динамическом переходе с февраля по май положительные аномалии среднезональной компоненты скорости ветра сменяются отрицательными аномалиями, спускающимися с мезосферы. При радиационном переходе зеркальная картина – отрицательные аномалии сменяются положительными. При раннем радиационном переходе (редкий тип перехода, смена режима ветра происходит до середины апреля) картина похожа на радиационный переход, но выглядит более размытой. С июня по сентябрь аномалии ветров во всех трех переходах имеют смешанную картину и слабые аномалии. При динамическом переходе с февраля по май отрицательные аномалии среднезональной температуры сменяются положительными аномалиями, спускающимися с мезосферы. При радиационном переходе положительная аномалия спускается к тропосфере быстрее. При раннем радиационном переходе картина похожа на динамический переход, но выглядит более размыто. Тропосфера в марте холоднее при радиационном переходе, в апреле не обнаружена зависимость от типа перехода, в мае и июне холоднее при перестройке динамического типа. Переход среднесуточной температуры через 0°C к положительным значениям происходит раньше при радиационном переходе. При динамическом и раннем радиационном переходах происходит в одинаковое время.

Аномалии температуры воздуха у поверхности земли и их связь с процессами в стратосфере

Екатерина Г. Алексеева¹, Ольга Г. Анискина¹

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

E.Alekseeva-rshu@yandex.ru

В настоящее время изучению процессам взаимодействия тропосфера и стратосфера уделяется особое внимание.

По данным о максимальной суточной температуре воздуха, представленными архивами проекта ECA & D [3], для холодного сезона с декабря по март, за временной период 1951-2018 гг., для каждого месяца были рассчитаны нормированные аномалии температуры для 46-ти метеорологических станций. Исследовались продолжительные положительные аномалии температуры воздуха на Европейской территории Российской Федерации. Значительным потеплением считались периоды, когда минимум 5 дней подряд нормированная положительная аномалия максимальной температуры воздуха была выше 90-го процентиля [1].

Проведенный анализ показал, что за весь период с декабря по март 1951-2018 гг. по пространственному распространению на исследуемых станциях аномально теплыми были: декабрь 2006 г., декабрь 2008 г., март 2007 г. и февраль 1990 г.

Выявлено, что самые продолжительные аномалии тепла наблюдались в январе 2007 года (19 дней) на станции Калининград (с 01 по 19 января 2007 года) и станции Трубчевск (с 05 по 23 января 2007 года); в декабре 2006 года (17 дней) на 7 станциях одновременно: Санкт-Петербург, Москва, Вытегра, Тихвин, Рыбинск, Старица и Максатиха (с 01 декабря по 17 декабря 2006 года); и в феврале 2002 года (17 дней) на станции Пудино (с 09 по 25 февраля 2002 года).

Проведенный анализ показал, что по характеру распространения аномалий в зимние месяцы преобладает западно-восточный перенос. В редких случаях потепление распространялось с юга на восток и север (как правило, не достигая 60° с.ш.) и с севера, северо-запада на юго-восток. Другая ситуация наблюдалась в марте – в большинстве случаев потепления начинались на северо-западе Европейской территории России с постепенным захватом южных станций. И только в двух случаях аномалии тепла распространялись с востока на запад.

Одним из факторов динамического взаимодействия между циркуляцией в нижней стратосфере и аномалиями температуры воздуха у поверхности земли в зимний период, является Северная кольцевая мода (NAM) [2].

Для анализа связи аномалий тепла с процессами в стратосфере, проанализирована корреляционная связь между положительными аномалиями температуры воздуха у подстилающей поверхности и индексом Северной кольцевой моды (NAM), представленным на сайте Института перспективных океанологических исследований Океанского университета Китая и Национальной лаборатории морских наук и технологий Циндао, профессором Jianping Li [4].

Проведенный корреляционный анализ показал, что максимальная связь индекса Северной кольцевой моды с положительными аномалиями температуры воздуха отчетливо прослеживается на северо-западе Европейской территории России – периоды аномального потепления совпадают с ярко выраженными положительными значениями индекса NAM.

1. Алексеева Е.Г., Анискина О.Г. Анализ длительных аномалий тепла в зимний период // Сборник тезисов Международной научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ». – СПб.: РГГМУ. – 2020. – С. 107 – 108.
2. Алексеева О.Г., Анискина О.Г. Влияние циркуляции атмосферы на экстремальную температуру воздуха на Северо-Западе России // Материалы Международной конференции «Климатические риски

и космическая погода» – Иркутск.: ИГУ. – 2021. – С. 238 – 242.

3. URL: <https://www.ecad.eu/> (дата обращения 18.02.2023 г.)

4. URL: <http://ljp.gcess.cn/dct/page/65571> (дата обращения – 18.02.2023 г.)

Симметричные относительно экватора корреляционные структуры в поле зонального ветра в стратосфере

Владимир В. Гурьянов^{1,2}

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет

² Санкт-Петербургский государственный университет

vv@kpfu.ru

Выполнено исследование межширотных взаимосвязей спектров Хаяши зонального ветра распространяющихся на восток (E) и на запад (W) волновых возмущений с периодами от 8 часов до 150 суток. Для этого использовались ежечасные данные реанализа ERA5 для двух пятимесячных периодов: ноябрь-март и май-сентябрь за 1979-2023. В результате были получены значимые положительные корреляционные связи расположенные симметрично относительно экватора в области проявления квазидвухлетней цикличности (КДЦ) для широт 20 с.ш.-20 ю.ш. и особенно для 15 с.ш.-15 ю.ш. и 10 с.ш.-10 ю.ш.

Теснота связей по-разному проявляется для разных периодичностей рассматриваемого спектра и для волн E и W. Анализ из-за большого объема информации был проведен для волнового числа 1, хотя сами спектры были рассчитаны в диапазоне волновых чисел 1-10. Следует отметить, что спектральный состав для двух пятимесячных периодов в целом отличается, но в общих чертах имеет много сходства.

Так, для волн E распространяющихся на восток наибольшая симметричная корреляция наблюдается для поверхностей 20 и 30 гПа для сезона с ноября по март. При этом для широт 15 с.ш.-15 ю.ш. выделяются периодичности 1,1-2,7 суток, 4-7 суток и 10-16 суток. Выше и ниже слоя 20-30 гПа симметричная корреляция менее выражена, а на 100 гПа она фактически отсутствует на всех широтах.

Для волн W распространяющихся на запад на уровне 10 гПа и выше четко выделяется повышенная корреляция (более 0,8) для суточного прилива на всех тропических широтах. Для области 15 с.ш.-15 ю.ш. помимо суточного прилива значения выше 0,8 наблюдаются для корреляций с периодичностями 1,2-1,4 суток, 2-3 суток и 4-6 суток для обоих пятимесячных периодов. Для периода с ноября по март дополнительно проявляется высокая (более 0,8) корреляция для периодов 8-10 суток.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что спектральный состав корреляций отличается для волн E и W.

Следует отметить, что для периодичностей 0,3-1 сутки существуют значимые связи для отдельных частот как для волн, распространяющихся на восток, так и для волн распространяющихся на запад. Однако они имеют фрагментарный характер и их вклад в общую изменчивость, скорее всего, лучше оценивать для диапазона частот.

Как для волн E, так и для волн W также имеют место высокие корреляции для периодов, превышающих 20 суток.

Таким образом, выполненное исследование показывает существование значимых корреляционных связей, симметричных относительно экватора, в поле волновых возмущений зонального ветра (E и W) в области квазидвухлетних колебаний. Установленная симметрия может быть обусловлена доминированием экваториально-симметричных волн (Кельвина и смешанных Россби-гравитационных волн) в формировании КДЦ.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Санкт-Петербургский государственный университет", грант РНФ № 25-47-00122

Шестнадцатидневная атмосферная планетарная волна во временных вариациях магнитного поля земли по данным европейских станций

Светлана А. Рябова^{1,2}

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук , Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук , Россия

riabovasa@mail.ru

Типичные для планетарных волн периоды (близкие к периодам 2, 5, 10 и 16 суток) были сначала обнаружены в вариациях ионосферного поглощения радиоволн (D-область), которые ассоциировались с одновременными 5-суточными волнами в стратосфере. Результаты исследований в целом подтверждают подобие спектров возмущений (в диапазоне периодов планетарных волн) в атмосфере и различных ионосферных слоях. Вместе с тем было обращено внимание и на возможность проникновения этих возмущений на высоту более 100 км.

В настоящей работе с использованием результатов геомагнитного мониторинга на европейских станциях, а также методов спектрального анализа исследованы спектральные гармоники в диапазоне периодов от 12.5 до 17 суток.

Результаты исследований, проведенных в настоящей работе, показывают, что в спектрах временных вариаций геомагнитного поля (наблюдаемых на земной поверхности и обусловленных вариациями ионосферных токов) присутствуют как гармоники, связанные с солнечной активностью, так и гармоники, соответствующие квази-16-дневным планетарным волнам. Кроме того, в спектре вариаций горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля в диапазоне периодов от 12.5 до 17 суток выделены гармоники, связанные с модуляционным воздействием более длиннoperиодных вариаций и приливным воздействием. Это свидетельствует о важности переноса энергии атмосферными волнами на ионосферные высоты и их влиянии на динамические и электродинамические процессы в ионосфере.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798-8), интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Постерная сессия

Ионосферные эффекты в доплеровском сдвига частоты на внезапные начала геомагнитных бурь

Галина Д. Пак¹, Назыф М. Салихов¹, Серик М. Нуракынов^{1,1}

¹ ТОО «Институт ионосферы» Аэрокосмический комитет Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности

GPak1@yandex.ru

За период с декабря 2023 по октябрь 2024 выполнен анализ геофизических проявлений 6 сильных магнитных бурь уровня G3-G5. Каждая буря характеризуется внезапным началом (Storm Sudden Commencement - SSC), которое возникает при резком возрастании скорости солнечного ветра и взаимодействии плотных ускоренных потоков солнечного ветра с магнитосферой Земли. Исследован ионосферный отклик на SSC событие. Параметры солнечного ветра получены со спутника NASA - Advanced Composition Explorer (ACE), который находится на расстоянии примерно 1,5 миллиона километров от Земли, вблизи точки Лагранжа L1 в системе Солнце-Земля. В работе использовали индукционный магнитометр ИМС-008 с частотой дискретизации 66 Гц. Вариационные измерения XYZ-компонент геомагнитного поля выполнены феррозондовым магнитометром LEMI-008 геомагнитной обсерватории Института ионосферы (<https://ionos.kz/geomagnetic-observatory>), географические координаты (43,10°N; 76,57°E). Доплеровские измерения сигнала, отраженного от ионосферы, проводили на наклонных радиотрассах с частотой дискретизации 25 Гц, используя сигналы радиовещательных передатчиков, находящихся в Китае, Кыргызстане и Кувейте [1].

Прослежено импульсное воздействие межпланетных ударных волн на магнитосферу и процессы взаимодействия магнитосферы с ионосферой. Доплеровским ионозондом определено начало реакции ионосферы на импульсное воздействие межпланетных ударных волн. Задержка появления возмущения в ДСЧ (постоянная времени реакции ионосферы) на внезапное начало бури составила в среднем 45-107 секунд. Показано высокое временное разрешение и чувствительность индукционного магнитометра IMS-008 для регистрации внезапного начала магнитных бурь, выявлена опережающая реакция относительно отклика, зарегистрированного феррозондовым магнитометром LEMI-008.

1. Salikhov, N.; Shepetov, A.; Pak, G.; Saveliev, V.; Nurakynov, S.; Ryabov, V.; Zhukov, V. A PLL Based Doppler Method Using an SDR-Receiver for Investigation of Seismogenic and Man-Made Disturbances in the Ionosphere. *Geosciences* 2024, 14, 192. <https://doi.org/10.3390/geosciences14070192>

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования номер гранта АР 19678127 “Развитие методов и средств геофизического мониторинга для исследования процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера в сейсмоопасном регионе Северного Тянь-Шаня”.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан", грант АР19678127

Численное моделирование влияния солнечной активности на амплитуды атмосферных приливов

Андрей В. Коваль¹, Татьяна С. Ермакова², Ксения А. Диденко³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Российский государственный гидрометеорологический университет

³ Институт земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина

a.v.koval@spbu.ru

Солнечные термические приливы, оказывают существенное влияние на динамику атмосферы, при этом на высотах мезосфера и нижней термосфера (МНТ) приливы, наряду с гравитационными волнами, играют основную роль в формировании термодинамического режима атмосферы. Солнечные приливы – это колебания глобального масштаба с периодами солнечных суток (24 ч) и его гармоник (12, 8 и 6 ч), которые возникают главным образом в результате поглощения солнечной радиации водяным паром в тропосфере, озоном в стратосфере и ионизацией кислорода УФ излучением в термосфере/ионосфере. В рамках цикла работ, посвященных изучению чувствительности крупномасштабных волновых процессов к изменению солнечной активности (СА), были проведены численные расчеты глобальной атмосферной циркуляции с помощью нелинейной модели средней и верхней атмосферы МСВА. Рассматривались два ансамбля модельных расчетов, состоящие из 16 реализаций. Амплитуды приливов были осреднены по соответствующим ансамблям (высокая/низкая СА). Были рассмотрены следующие приливы: мигрирующие суточный и полусуточный приливы с зональными волновыми числами, соответственно, 1 и 2, немигрирующие суточный и полусуточный приливы с зональными числами, соответственно, 2 и 1, а также немигрирующий суточный прилив, распространяющийся на восток, с волновым числом 3. Для анализа был выбран январь месяц. Это позволило нам детально рассмотреть изменчивость немигрирующих приливов: основной механизм их генерации, заключается в нелинейных взаимодействиях мигрирующих приливов с квазистационарными планетарными волнами, амплитуды которых максимизируются в течение зимних месяцев, что повышает эффективность указанного механизма. В модели МСВА генерация приливов происходит самосогласованно, за счет параметризации солнечного нагрева и нелинейных взаимодействий между гравитационными волнами и планетарными волнами. Показано, в частности, характерное для усиления солнечного воздействия ослабление амплитуды прилива в диапазоне высот 100-150 км и усиление – на больших высотах. Объяснить этот эффект можно увеличением вертикального температурного градиента в нижней термосфере, а также увеличением теплопроводности, которая пропорциональна температуре, что затрудняет проникновение приливов в термосферу на большие высоты при увеличении СА. Однако на высотах больше 160 км эффект от усиления поглощения прямого ЭУФ излучения, возрастающего при высокой СА, доминирует, и амплитуды приливов на больших высотах при максимальной СА увеличиваются. Дальнейший анализ изменения амплитуд немигрирующих приливов показал их существенную зависимость от особенностей распространения в термосферу стационарных планетарных волн с зональным числом 1 и 2. Для анализа направления распространения были рассмотрены также фазы приливов.

Исследование волновых процессов в области субавроральной верхней атмосферы и нижней термосферы

Григорий С. Теленков¹, Игорь И. Колтовской¹, Олеся В. Тышук¹

¹ Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

telgs@ikfia.ysn.ru

Волновые процессы в верхней атмосфере и ионосфере охватывают широкий спектр явлений, важных для таких областей, как геофизика, радиофизика и физика плазмы. Одним из основных видов волн, которые отвечают за передачу энергии и импульса, являются внутренние гравитационные волны. Генерация таких волн преимущественно происходит в нижних слоях атмосферы или на её границе в ходе активных метеорологических процессов и орографических особенностей рельефа. Распространяясь вверх, они переносят энергию и импульс из нижележащих слоёв атмосферы в вышележащие. Таким образом, внутренние гравитационные волны играют важную роль в термодинамическом равновесии всей атмосферы, влияя на тепловой баланс и среднезональную циркуляцию.

В отличие от низких и средних широт, в высоких широтах волновые процессы отличаются особым многообразием. Изучение характеристик этих процессов может предоставить дополнительную информацию о происходящих явлениях. Поэтому исследование волновых процессов в верхней атмосфере и ионосфере представляет интерес не только с практической точки зрения, но и для фундаментальных научных задач.

В данном докладе представлены параметры внутренних гравитационных волн зарегистрированные при помощи инфракрасной цифровой камеры всего неба, установленной на оптическом полигоне Маймага.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Государственное задание", грант ИКФИА СО РАН

Атмосферные возмущения, вызванные прохождением волны цунами

Юлия А. Курдяева¹ , Ольга П. Борчевкина¹ , Сергей П. Кшевецкий^{2,3,4}

¹ Калининградский филиал Института Земного Магнетизма, Ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН , Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет

³ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

yakurdyaeva@gmail.com

Обнаружение и прогнозирование волн цунами является актуальной задачей современной геофизики. Волны цунами, образование которых обычно связано с тектоническими движениями под толщей воды, являются источником атмосферных волн в широком диапазоне частот, которые распространяются до термосферных высот. Волна цунами генерирует в атмосфере акустические (АВ) и внутренние гравитационные волны (ВГВ).

Атмосфера является средой, в которой эффективно распространяются возмущения от поверхностных океанских волн. Основная роль в таком процессе принадлежит инфразвуку. Для качественного моделирования таких волн необходимо использование численной модели, которая правильно разрешает АВ и ВГВ в широком диапазоне высот. Вследствие значительных амплитуд атмосферных волн на больших высотах для правильного расчета их распространения требуется математическое доказательство неотрицательности плотности и температуры в численных моделях. Коэффициенты решаемых уравнений очень сильно изменяются с высотой и численный метод модели должен минимизировать накопление вычислительных ошибок. В исследовании используется численная региональная модель нейтральной атмосферы AtmoSym, основанная на решении системы нелинейных гидродинамических уравнений, которая удовлетворяет этим требованиям.

В работе рассмотрены особенности постановки численного эксперимента для моделирования атмосферных возмущений, вызванных цунами. Проведены расчеты для цунами, зафиксированного 17 июня 2017 года на западном побережье Гренландии. Это цунами было вызвано субаэральным оползнем, который произошел во фьорде. Так же были проведены расчеты для более значительного события – цунами, наблюдавшегося вследствие сильного землетрясение в Японии 11 марта 2011 года (Тохоку). Проведен анализ зависимости отклика верхней атмосферы от интенсивности волны цунами в тропосфере. В случае моделирования волны цунами в Японии произведен численный расчет с учетом предшествующего ему землетрясения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский Научный Фонд", грант 23-77-10004

Вертикальная структура внетропических циклонов и антициклонов в Северном полушарии по данным реанализа ERA5

Ульяна И. Антипина^{1,2}, Мирсейд Г. Акперов^{1,3}, Георгий С. Голицын¹, Владимир А. Семенов^{1,3}

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля

³ Институт географии Российской академии наук

ant.uly@yandex.ru

Циклоны и антициклоны играют важную роль в общей циркуляции атмосферы и в формировании погодной изменчивости во внетропических широтах [Hartmann et al., IPCC, 2013; Мещерская и др., 2014; Интенсивные атмосферные вихри ..., 2018]. Для последних десятилетий исследованы характеристики циклонической и антициклонической активности в атмосфере Северного полушария с учетом их вертикальной структуры, в том числе траектории циклонов и антициклонов, их глубина, продолжительность, интенсивность и частота на различных уровнях давления в атмосфере. Для анализа характеристик атмосферных циклонов и антициклонов во внетропических широтах ($>20^\circ$) Северного полушария использовались высоты изобарической поверхности 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 300, 200 гПа по данным реанализа ERA5 с шагом по времени 6 часов и горизонтальным пространственным разрешением 0.25⁰ для периода 1979-2024 гг. Для идентификации циклонов и антициклонов использовался объективный метод идентификации вихрей, с помощью которого строились траектории как по пространству и по высотам в атмосфере. Количество циклонов и антициклонов и их характеристики меняются в зависимости от высоты. Показано, что количество и свойства вихревых образований существенно зависят от анализируемой высоты изобарической поверхности: максимальная повторяемость циклонов наблюдается у поверхности, затем снижается с высотой, с выраженным вторичным максимумом на уровне 500 гПа Уменьшение антициклонов происходит гораздо быстрее с высотой в сопоставлении с циклонами. Проанализирована связь циклонов и антициклонов с вариациями приповерхностной температуры (минимальная, средняя, максимальная), ветра (максимальная, средняя) и количества осадков. В работе также анализировались тренды характеристик циклонов и антициклонов, включая их сезонную и многолетнюю изменчивость.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 24-17-00138

**СЕКЦИЯ 8. СТРУКТУРА и СОСТАВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ
ПЛАНЕТ**

Председатель: д.ф.-м.н. **Клименко М.В.** (КФ ИЗМИРАН, Калининград, Россия)

Сопредседатель: д.ф.-м.н. **Мингалев И.В.** (ПГИ, Апатиты, Россия)

Устные доклады

Анализ динамики параметров ионосферы в периоды сильных геомагнитных бурь и землетрясений на Камчатке в 2023-2024 гг. (по данным ГНСС)

Алексей В. Павлов¹, Оксана В. Мандрикова¹

¹ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук

pavlov@ikir.ru

Полное электронное содержание (ПЭС), получаемое по данным глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), находит широкое применение в области фундаментальных исследований солнечно-земной физики и прикладных задач космической погоды. С целью исследования изменчивости ионосферы в Камчатском крае в периоды высокой геомагнитной активности, а также в периоды, сопровождаемые высокой сейсмической и вулканической активностями, был проведен анализ данных региональной сети приёмников ГНСС за март-апрель 2023 г. и август 2024 г. Для шести приёмников, входящих в региональную сеть, произведен расчёт значений абсолютного вертикального ПЭС с учётом дифференциальных кодовых задержек, и определены отклонения значений ПЭС от фонового уровня. Также, по данным сети приемников, произведено вычисление индекса возмущённости вертикальных вариаций полного электронного содержания (WTEC) для периодов колебаний ПЭС в диапазонах 1-10 и 1-40 минут, соответствующих средне- и крупномасштабным ионосферным возмущениям. Для детального изучения динамики оцененных характеристик состояния ионосферы использовался алгоритм адаптивной вейвлет-фильтрации, основанный на комбинации дискретных вейвлет-разложений с адаптивными пороговыми оценками.

В результате исследования выделены особенности поведения рассматриваемых ионосферных характеристик, наблюдаемые в периоды сильных геомагнитных бурь 23.03.2023-24.03.2023 гг. ($K_p=8$, $Dst_{min} = -163$ нТл), 23.04.2023-24.04.2023 гг. ($K_p=8_+$, $Dst_{min} = -213$ нТл), 04.08.2024 ($K_p=7$, $Dst_{min} = -100$ нТл) и 12.08.2024 гг. ($K_p=8$, $Dst_{min} = -188$ нТл). Выделенные аномальные изменения вариаций значений абсолютных вертикальных ПЭС имели вид отрицательных отклонений от значений фонового уровня, при этом наблюдалось возрастание значений индексов WTEC для рассматриваемых периодов колебаний ПЭС. Примерно, за двое суток до наступления землетрясения с магнитудой $M=6.6$, произошедшего 03.04.2023 02:06:56 (UT) у восточного побережья Камчатки, на фоне умеренной геомагнитной активности, в ночные часы по местному времени наблюдалось возрастание индексов WTEC до значений 0.1-0.3 TECU для периодов колебаний ПЭС в диапазоне 1-10 минут для всех рассматриваемых приёмников ГНСС. В период извержения вулкана Шивелуч, по данным приёмника klu1, расположенного в окрестности вулкана, на фоне низкой геомагнитной активности в течение 11.04.2023-12.04.2023 гг. в ночное время по LT наблюдались возмущения ПЭС, превышающие верхнюю границу диапазона фоновых значений. На остальных приёмниках отмечалось возрастание индексов WTEC до значений 0.08-0.15 TECU для периодов колебаний ПЭС в диапазоне 1-10 минут. В течение суток, предшествующих наступлению землетрясения с магнитудой $M=7.0$, произошедшего у восточного побережья Камчатки 17.08.2024 19:10:25 (UT), на фоне умеренной геомагнитной активности ($K_p=3_-$), наблюдались вариации ПЭС, положительные относительные отклонения которых от фонового уровня достигали значений от 20% до 40%. Детальный анализ вариаций оцененных характеристик состояния ионосферы, выполненный с использованием вейвлет-разложений, подтвердил достоверность полученных результатов исследования.

Многолетние изменения температуры и волновой активности в области мезопаузы по наблюдениям в Звенигороде

Владимир И. Перминов¹, Николай Н. Перцев¹, Петр А. Далин², Николай М. Гаврилов³, Андрей А. Попов³, Владимир А. Суходоев¹, Максим Д. Орехов¹, Владимир А. Семенов¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

² Шведский институт космической физики, г. Кируна, Швеция

³ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

v.perminov@rambler.ru

Многолетние наблюдения характеристик различных областей атмосферы имеют важное значение для понимания климатических изменений, имеющих характер как квазипериодических колебаний, так и многолетних трендов, вызванных естественными процессами или/и антропогенным воздействием. Для длительного мониторинга теплового режима области мезопаузы (80–100 км) широко используются измерения вращательной температуры колебательно-возбужденного гидроксила (ОН*). Излучающий слой OH* имеет максимум интенсивности на высоте ~87 км и полуширину ~9 км. Средневзвешенная по высоте температура OH* может быть относительно легко наблюдать с поверхности Земли в ночное время при ясной погоде. В настоящей работе представляются ее наблюдения на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН в 2000–2024 гг. Спектральная аппаратура позволяла определять температуру OH* по ее вращательной структуре в полосе (6-2). Проанализирован температурный ряд, состоящий из 100334 значений 10-минутных измерений. На его основе выполнены оценки многолетнего тренда для среднегодовой (-0.13 ± 0.03 К/год) и среднесезонных (май–июль (-0.18 ± 0.06 К/год) и октябрь–март (-0.10 ± 0.06 К/год)) температур, а также определена их зависимость от солнечной активности.

Предполагается, что за охлаждение слоев средней и верхней атмосферы в основном ответственен рост концентрации углекислого газа в атмосфере. Однако модельные вычисления предсказывают, что радиационное охлаждение в области мезопаузы за счет роста углекислого газа не должно быть сильнее -0.1 К/год. Одной из причин расхождения результатов экспериментальных и модельных исследований может быть недооценка долговременных изменений в атмосферной динамике, которая в области мезопаузы определяется в основном волновыми процессами. С этой целью были проанализированы среднегодовые и среднесезонные стандартные отклонения температуры, определенные методом разностной цифровой частотной фильтрации. Рассматриваемые стандартные отклонения позволили оценить многолетний тренд волновой активности в различных диапазонах частот мезомасштабных вариаций, который оказался положительным во всех случаях с величиной, зависимой от частоты вариаций.

Данная работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки по темам 125021001819-8 и 17.1.

Множественный регрессионный анализ изменений характеристик верхней атмосферы по данным наблюдений в Восточной Сибири в 24-м солнечном цикле

Ирина В. Медведева¹, Константин Г. Ратовский¹

¹ Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

ivmed@iszf.irk.ru

Представлены результаты анализа изменений параметров верхней нейтральной атмосферы и ионосферы в регионе Восточной Сибири в 24-м солнечном цикле на основе данных многолетних измерений на комплексе инструментов Института солнечно-земной физики СО РАН. Для анализа использованы данные спектрометрических и радиофизических измерений в 2008-2020 гг. Проанализированы данные о температуре области мезопаузы T_m , полученные при помощи спектрометрических измерений параметров эмиссии молекулы гидроксила (полоса (6-2), 834.0 нм, высота максимума излучения ~ 87 км), в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8° N, 103.1° E, Торы), и данные о максимуме электронной концентрации $NmF2$, полученные по данным вертикального зондирования на иркутском ионозонде DPS-4 (52.3° N, 104.3° E). Вращательная температура молекулы гидроксила, получаемая из регистрируемых спектров, отображает температуру атмосферы на высотах мезопаузы. Анализ реализован на основе множественной линейной регрессии характеристик верхней атмосферы на индексы солнечной и геомагнитной активности, а также индексы различных атмосферных осцилляций. Обнаружено, что межгодовые изменения среднегодовых значений $NmF2$ преимущественно обусловлены изменениями солнечной активности (F10.7). На вариации среднегодовых значений изменчивости $\sigma NmF2$ влияют как солнечная (F10.7), так и геомагнитная (Ap) активность. В отличие от ионосферных характеристик, межгодовые изменения температуры мезопаузы и ее изменчивости слабо коррелируют с индексами F10.7 и Ap. Для дальнейшего анализа поведения температуры мезопаузы были привлечены индексы Североатлантической (NAO), Арктической (AO) и Южной (SOI), осцилляций атмосферы, что привело к значительному повышению коэффициентов детерминации. Так, для межгодовых изменений температуры мезопаузы, коэффициент детерминации для регрессии на индексы AO и F10.7 составил 71.8, а на индексы NAO и F10.7 - 71.4, что в ~ 8 раз превышает коэффициент детерминации для регрессии на индексы F10.7 и Ap. Для температурной изменчивости σT_m , наиболее высокие коэффициенты детерминации получены для множественной регрессии на SOI и Ap. Полученные результаты могут свидетельствовать о существенном воздействии процессов в нижней атмосфере на температурный режим области мезопаузы средних широт в анализируемый временной интервал.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00187, <https://rscf.ru/project/25-17-00187>.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 25-17-00187

Насыщение водяного пара в мезосфере и термосфере Марса по данным затменного эксперимента ACS миссии ExoMars/TGO

Денис А. Беляев¹, Анна А. Федорова¹, Александр Трохимовский¹, Мария Жарикова¹, Михаил С. Лугинин¹, Франк Монтмессан², Олег И. Кораблев¹

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

² ЛАТМОС/ЦНРС, Франция

dbelyaev@cosmos.ru

В работе представлено распределение содержания и уровня насыщения водяного пара в мезосфере и термосфере Марса, на высотах от 50 до 125 км. Статистика наблюдений охватывает высотные профили, измеренные в марсианские годы (MY) с середины 34-го (Июнь 2028 г.) по конец 37-го (Ноябрь 2024 г.), включая последнюю глобальную пылевую бурю, случившуюся в 34-м MY. Наши результаты основаны на измерениях солнечного затмения в диапазоне длин волн 2.66-2.70 мкм, выполненных российским прибором АЦС (ACS - Atmospheric Chemistry Suite) на борту орбитального аппарата ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) [1]. Наблюдения в указанном спектральном интервале проводятся каналом высокого разрешения ACS-MIR, регистрирующем в спектрах атмосферного пропускания линии поглощения молекул CO_2 и H_2O . Это позволяет восстанавливать вертикальные профили температуры, давления и концентрации молекул в слоях мезосферы и термосферы [2].

По результатам нашего эксперимента, максимальное содержание водяного пара результирует наблюдается сезон перигелия (лето в южном полушарии), а также во время пылевых бурь. В эти периоды повышенное содержание паров воды в мезосфере (50-100 км) варьируется в пределах 100-200 ppm (частей на миллион) и они достигают высот нижней термосферы, 100-125 км, с содержанием 20-50 ppm. С другой стороны, в сезон афелия (зима в южном полушарии) водяной пар задерживается в нижней атмосфере и его содержание на превышает значений 1-2 ppm. Одновременные измерения высотных профилей концентрации H_2O , температуры и давления позволили оценить уровень насыщения паров воды в исследуемых слоях атмосферы. Условия перенасыщения водой наблюдаются именно в сезон в перигелия выше 80 км, где отношение парциального давления H_2O превышает давление насыщенного пара в 10 раз. Аналогичные значения были получены и по измерениям в ближнем инфракрасном диапазоне прибора ACS-NIR на высотах мезосферы [4]. Наблюдаемый сезонный всплеск содержания и насыщения водяного пара в транзитной зоне мезосферы/термосферы увеличивает концентрацию атомарного водорода, освобождаемого в результате фотолиза молекулы H_2O на этих высотах. Это впоследствии увеличивает его диссипацию с планеты и подтверждает механизм регулярной, сезонной потери воды Марсом. Исследование выполняется при поддержке гранта РНФ №23-12-00207.

Ссылки:

- [1] Korablev O.I. et al., 2018. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. Space Science Reviews. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>. [2] Belyaev D.A. et al., 2021. Revealing a high water abundance in the upper mesosphere of Mars with ACS onboard TGO. Geophysical Research Letters. <https://doi.org/10.1029/2021GL093411>. [3] Belyaev D.A. et al., 2022. Thermal structure of the middle and upper atmosphere of Mars from ACS/TGO CO₂ spectroscopy. Journal of Geophysical Research: Planets. <https://doi.org/10.1029/2022JE007286>. [4] Fedorova A.A. et al., 2022. A two-Martian years survey of the water vapor saturation state on Mars based on ACS NIR/TGO occultations. Journal of Geophysical Research: Planets. <https://doi.org/10.1029/2022JE007348>.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 23-12-00207

Структура верхней атмосферы Марса по данным затменного эксперимента ACS миссии ExoMars/TGO

Дария А. Коссова^{1,2}, Денис А. Беляев¹, Екатерина Д. Стариченко¹, Анна А. Федорова¹, Александр Ю. Трохимосвский¹, Франк Монтмессан³, Олег И. Кораблев¹

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

² Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

³ ЛАТМОС/ЦНРС, Франция

dakossova@edu.hse.ru

В работе исследуются высоты средней и верхней атмосферы Марса - мезосфера (выше ~50 км) и термосфера (выше 100-120 км) - вплоть до экзобазы для молекулы CO₂ (180-220 км). Рассматриваются сезонные вариации переходных областей верхней атмосферы: мезопаузы, находящейся на высотах около 80-120 км, где наблюдается температурный минимум, а также гомопаузы, расположенной на 10-20 км выше, где турбулентная диффузия меняется на молекулярную, индивидуальную для каждой компоненты. Вариации высоты и температуры мезо/гомопаузы, а также экзобазы, обусловлены сезонной изменчивостью, солнечной активностью, в том числе и вертикальным переносом энергии, вызванным глобальной циркуляцией и атмосферными волнами [1, 2].

В работе представлены вертикальные распределения температуры и концентрации CO₂, измеренные российским спектрометром АЦС (ACS - Atmospheric Chemistry Suite), работающего на борту орбитального модуля Trace Gas Orbiter (TGO) миссии ExoMars-2016 [3]. С апреля 2018 года канал ACS среднего инфракрасного диапазона (ACS-MIR, 2.2-4.3 мкм) осуществляет зондирование атмосферы Марса в режиме солнечных затмений. Концентрация и температура восстанавливаются по спектрам атмосферного пропускания, измеренных в линиях поглощения CO₂ около 2.7 мкм с высоким спектральным разрешением, охватывая высоты от 10 до 180 км - тропосферу, мезосферу и термосферу Марса [4]. В работе показаны результаты наблюдений за 2.5 марсианских года (MY) - от середины MY34 до конца MY36 - с сезонными и широтными вариациями температуры и высоты мезопаузы, гомопаузы и экзобазы. Зона гомопаузы определяется по сопоставлению коэффициентов молекулярной (CO₂) и турбулентной диффузий при условии насыщения атмосферных гравитационных волн около 80-120 км [5], которые по данным ACS регистрируются в вертикальных профилях температуры [2]. В работе также приведена валидация данных ACS с солнечными затмениями спектрометра EUVM миссии MAVEN [6] и с моделью глобальной циркуляции GCM [1].

Исследование выполняется при поддержке гранта РНФ № 25-22-00494, <https://rscf.ru/project/25-22-00494/>.

Литература:

[1] González-Galindo F. et al., 2015. Variability of the Martian thermosphere during eight Martian years as simulated by a ground-to-exosphere global circulation model. *J. Geophys. Res. Planets*, <https://doi.org/10.1002/2015JE004925>.

[2] Starichenko E. et al., 2024. Climatology of gravity wave activity based on two Martian years from ACS/TGO observations. *A&A*, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348685>.

- [3] Korablev O. et al., 2018. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>.
- [4] Belyaev D. et al., 2022. Thermal structure of the middle and upper atmosphere of Mars from ACS/TGO CO₂ spectroscopy. *J. Geophys. Res. Planets*, <https://doi.org/10.1029/2022JE007286>.
- [5] Slipinski M. et al., 2018. Variability of Martian turbopause altitudes. *J. Geophys. Res. Planets*, <https://doi.org/10.1029/2018JE005704>.
- [6] Thiemann E. et al., 2018. Mars thermospheric variability revealed by MAVEN EUVM solar occultations: Structure at aphelion and perihelion and response to EUV forcing. *J. Geophys. Res.*, <https://doi.org/10.1029/2018JE005550>.

Исследование проведено при поддержке:

1. "РНФ", грант 25-22-00494

Приливной анализ параметров термосферы и ионосферы во время геомагнитной бури 9-14 мая 2024 года

Федор С. Бессараб¹, Ольга П. Борчевкина¹, Павел А. Васильев¹, Иван В. Карпов¹

¹ Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина

bessarabf@gmail.com

В данной работе представлено исследование эффектов экстремальной геомагнитной бури 9-14 мая 2024 г на параметры термосферы и ионосферы, которое было выполнено с помощью глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (GSM TIP). Геомагнитные бури - события, оказывающие драматическое влияние на нейтральные и ионизированные компоненты верхней атмосферы в глобальном масштабе. Для исследования таких крупномасштабных явлений эффективно используется приливной анализ.

Показано, что ГСМ ТИП хорошо воспроизводит комплекс изменений в термосфере и ионосфере, связанных с геомагнитной бурей. Приливной анализ полученных модельных результатов показал, что в спокойных условиях преобладают солнечно-мигрирующие приливы, причем в нижней термосфере амплитуды суточных и полусуточных приливов невелики и сопоставимы по величине. В верхней термосфере доминируют суточные мигрирующие приливы, амплитуда которых превосходит полусуточные в несколько раз.

В максимуме геомагнитной бури, в нижней термосфере, амплитуды суточных и полусуточных приливов усиливаются в высоких и средних широтах. В верхней термосфере амплитуда суточного мигрирующего прилива уменьшается, особенно в экваториальной области. Амплитуда же SW2 незначительно возрастает, главным образом в южном полушарии. Во время возмущения меняется и модовый состав приливов, главным образом, в нижней термосфере. В суточном приливе возбуждается мода DW2, которая преобладает в высоких широтах. При анализе полусуточного прилива показано, что во время основной фазы бури 10-11 мая развивается и доминирует мода SW4. Этап восстановления бури длился два дня, после которого первоначальный модовый состав приливов восстановился.

Для сравнения результатов анализа приливов в расчетах ГСМ ТИП с экспериментальными данными, аналогичная процедура была выполнена с глобальными картами полного электронного содержания (GIMP), которые готовит Jet Propulsion Laboratory (JPL). Полученная структура суточных и полусуточных приливов в целом хорошо согласуется с аналогичной, полученной в расчетах для верхней термосферы.

Марс-Экспресс: 20 лет исследований атмосферы Марса с орбиты

Анна А. Федорова¹, Олег Кораблев¹, Людмила Засова¹, Николай Игнатьев¹, Александр Трохимовский¹, Александр Ломакин¹, Франк Монтмессан², Марко Джуррано³, Жан-Пьер Бибринг⁴, Жан-Лу Берто²

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

² LATMOS-UVSQ, Франция

³ IAPS Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, INAF Istituto Nazionale di AstroFisica, Италия

⁴ Institut d'Astrophysique Spatiale, Франция

fedorova@cosmos.ru

В 2024 году исполнилось 20 лет с момента начала научной программы орбитального аппарата «Марс-Экспресс» на орбите вокруг Марса. На борту космического аппарата установлено несколько спектрометров от УФ до теплового ИК-диапазона спектра, в разработку и последующий анализ данных которых значительный склад внесли российские учёные. Это спектрометры PFS (Planetary Fourier Spectrometer), OMEGA (Observatoire pour la Mineralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activite) и SPICAM (Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars). За годы работы миссии получен большой объём информации о составе, структуре и динамике марсианской атмосферы. Многолетние наблюдения позволили впервые на Марсе провести исследования устойчивости климата на планете. Полосы поглощения льдов в ИК-диапазоне позволяют изучать состав и сезонные изменения полярных шапок. К настоящему времени часть спектрометров прекратила работу, однако на борту космического аппарата продолжают работать ИК-канал SPICAM и видимый канал OMEGA. Результаты двадцатилетней работы «Марс-Экспресс» опубликованы в специальном выпуске Space Science Reviews [1-7]. В докладе будут представлены наиболее яркие результаты в области изучения атмосферы, полученные при участии российских учёных.

Литература:

- 1) Montmessin F., Fedorova A., Alday J. et al. Mars' Water Cycle and Escape: A View from Mars Express and Beyond // Space Sci Rev 220, 77 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01099-6>.
- 2) Vandaele A.C., Aoki S., Bauduin S. et al. Composition and Chemistry of the Martian Atmosphere as Observed by Mars Express and ExoMars Trace Gas Orbiter // Space Sci Rev 220, 75 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01109-7>.
- 3) Määttänen A., Fedorova A., Giuranna M. et al. Dust and Clouds on Mars: The View from Mars Express // Space Sci Rev 220, 63 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01092-z>.
- 4) González-Galindo F., Gérard JC., Soret L. et al. Airglow and Aurora in the Martian Atmosphere: Contributions by the Mars Express and ExoMars TGO Missions // Space Sci Rev 220, 42 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01077-y>.
- 5) Sánchez-Lavega A., del Río-Gaztelurrutia T., Spiga A. et al. Dynamical Phenomena in the Martian Atmosphere Through Mars Express Imaging // Space Sci Rev 220, 16 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01047-4>.
- 6) Cardesin-Moinelo, A., Godfrey, J., Grotheer, E. et al. Mars Express: 20 Years of Mission, Science Operations and Data Archiving. *Space Sci Rev* **220**, 25 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01059-0>
- 7) Giuranna, M., Tellmann, S., Montmessin, F. et al. Vertical Structure of the Martian Atmosphere: The View from Mars Express. *Space Sci Rev* **221**, 36 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11214-025-01155-9>

Поглощение хлороводорода аэрозолями водяного льда в атмосфере Марса по данным прибора ACS проекта «ЭкзоМарс»

Михаил С. Лугинин¹, Александр Ю. Трохимовский¹, Бенжамин Тайсум², Анна А. Федорова¹, Олег И. Кораблев¹, Кевин Олсен³, Франк Монмессан⁴, Франк Лефевр⁴

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

² Институт исследования планет, Немецкий центр авиации и космонавтики, Германия

³ Оксфордский университет, Великобритания

⁴ LATMOS, Франция

mikhail.luginin@cosmos.ru

В 2020 году в атмосфере Марса с помощью прибора ACS (Atmospheric Chemistry Suite) проекта «ЭкзоМарс» были обнаружены молекулы хлороводорода [1]. Наблюдения показали сезонное увеличение объемной концентрации до 5 ppbv (миллиардных частей по объёму) в период перигелия, за которым следует внезапное падение значений ниже предела детектирования (<0.1 ppbv) [2, 3]. Такое быстрое исчезновение HCl из атмосферы противоречит общепринятой на тот момент оценке времени жизни хлороводорода (> 70 земных суток) [3, 4].

Согласно лабораторным измерениям [5], значительную роль в удалении хлороводорода из атмосферы Марса может играть процесс поглощения HCl частицами облаков водяного льда [1, 3]. В данной работе будут продемонстрированы примеры антикорреляции между HCl и водяным льдом на высотах выше 20 км. Этот результат свидетельствует о наличии механизма быстрого (1-2 земных суток) удаления HCl из атмосферы Марса, позволяющий объяснить его сезонные колебания.

Для получения этого результата были обработаны данные прибора ACS за период в 2.5 марсианских года. В общей сложности были проанализированы 784 сеанса затмения, с которых были восстановлены вертикальные профили температуры, молярных концентраций HCl (при детектировании), водяного пара, аэрозольного ослабления и массовой концентрации частиц водяного льда.

Восстановление профилей концентрации HCl производился с помощью итеративного алгоритма Левенберга-Марквардта с регуляризацией Тихонова из данных ACS MIR в спектральном диапазоне 2922.5-2927.4 см⁻¹. Профили температуры и водяного пара восстанавливались из данных ACS NIR. Определение микрофизических свойств частиц пыли и водяного льда производилось из одновременного анализа данных ACS NIR в спектральном диапазоне 0.76-1.6 мкм и ACS MIR в диапазоне 3.09-3.46 мкм. Для восстановления вертикальных профилей коэффициента аэрозольного ослабления из профилей пропускания использовался метод «очистки луковицы» (обратное преобразование Абеля). Из полученных спектральных зависимостей коэффициента ослабления восстанавливались эффективный радиус, счётная и массовая концентрации водяного льда и минеральной пыли.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 23-12-00207 Российского научного фонда.

- [1] Koralev et al., 2021. Transient HCl in the atmosphere of Mars. *Sci. Adv.* 7 (7), 1-9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe4386> [2] Olsen et al., 2021. Seasonal reappearance of HCl in the atmosphere of Mars during the Mars year 35 dusty season. *Astron. Astrophys.* 1-14 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140329> [3] Aoki et al., 2021. Annual appearance of hydrogen chloride on Mars and a striking similarity with the water vapor vertical distribution observed by TGO/NOMAD. *Geophys. Res. Lett.* 48 (11), 1-11. <https://doi.org/10.1029/2021GL092506>. [4] Krasnopolsky, 2022. Photochemistry of HCl in the martian atmosphere. *Icarus* 374. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114807> [5] Kippenberger et al., 2019. Trapping of HCl and oxidised organic trace gases in growing ice at temperatures relevant to cirrus clouds. *Atmos. Chem. Phys.* 19 (18), 11939-11951. <https://doi.org/10.5194/acp-19-11939-2019>.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 23-12-00207

Постерная сессия

Исследование вариаций температурного профиля атмосферы по данным лидара

Николай Э. Сидоров¹ , Семен В. Титов¹

¹ Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

SidorovNikolay@ikfia.ysn.ru

Исследование вариаций температурного профиля атмосферы способствует лучшему пониманию распространения внутренних гравитационных волн (ВГВ) через слои атмосферы и оценке передачи количества импульса. Что в свою очередь поможет для прогноза климата, изучения атмосферы и разработки более точных прогностических моделей для оценки изменения климата и атмосферных процессов. В данной работе исследуются вариации температурного профиля, вызванные внутренними гравитационными волнами по данным лидара. Для этого были проведены наблюдения на стратосферном лидаре, а так же обработаны полученные данные с помощью программ PHC-Viewer, Eclipse. Разработан код в программе Pycharm на языке программирования Python для вычисления вариаций температурного профиля. И визуализация этих вариаций температурного профиля на программе OriginPro. В работе мы анализируем вариации температуры лидара вызванные гравитационными волнами на высотах от 20 до 60 км. Мы анализируемочные наблюдения, поскольку в дневное время отношение сигнал/шум недостаточно велико для расчета температуры. Основной акцент работы сделан на сравнении параметров ВГВ до, вовремя и после внезапных стратосферных потеплений.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант №25-27-20119

Структура верхней атмосферы Венеры по данным затменного эксперимента SOIR/VEEx

Елизавета С. Степанова¹, Денис А. Беляев¹, Анна А. Федорова¹, Олег И. Кораблев¹

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

fedorova-elizaveta@yandex.ru

Исследование мезосферы и термосферы Венеры играет ключевую роль в изучении ее атмосферных процессов, включая диссипацию воды, что подтверждается аномально высоким отношением [HDO/H₂O] (Fedorova et al., 2008; Mahieux et al., 2024). Также на основе исследований этих атмосферных слоев регулярно обновляются существующие фотохимические модели верхней атмосферы Венеры.

Наиболее обширная база наблюдений получена спектрометром SOIR на борту Venus Express (Nevejans et al., 2006). SOIR регистрировал линии поглощения в ИК-диапазоне (2.2–4.2 мкм) в режиме солнечного просвечивания, охватывая высоты 65–170 км. Помимо CO₂, прибор регистрировал малые газовые составляющие и изотопы: HO, HDO, HCl, SO и другие.

В работе представлены вертикальные профили температуры и плотности, восстановленные по спектрам CO₂ (2006–2014 гг.). Алгоритм восстановления, разработанный в ИКИ, использует зависимость интенсивности линий поглощения от температуры и гидростатическое приближение. Данный метод успешно применялся для обработки данных эксперимента ACS/ExoMars на Марсе (Fedorova et al., 2020; Belyaev et al., 2022). В отличие от альтернативного алгоритма ASIMAT (Mahieux et al., 2010, 2023), который работает только с ненасыщенными линиями, метод ИКИ охватывает более широкий диапазон высот.

Обновленные данные позволяют уточнить содержание малых газов, включая проверку аномального соотношения [HDO/H₂O].

Литература:

1. Fedorova et al. HDO and H₂O vertical distributions and isotopic ratio in the Venus mesosphere by Solar Occultation at Infrared spectrometer on board Venus Express // J. Geophys. Res., 2008, 113, E00B22, doi:10.1029/2008JE003146.
2. Mahieux et al, Unexpected increase of the deuterium to hydrogen ratio in the Venus mesosphere // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024.
3. Nevejans et al. Compact high-resolution spaceborne echelle grating spectrometer with acousto-optical tunable filter based order sorting for the infrared domain from 2.2 to 4.3 microm. // Appl Opt. 2006. Jul 20;45(21):5191-206. doi: 10.1364/ao.45.005191.
4. Fedorova et al. Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season // Science, 2020, 367. eaay9522. doi:10.1126/science.aay9522.
5. Belyaev et al. Thermal Structure of the Middle and Upper Atmosphere of Mars From ACS/TGO CO₂ Spectroscopy // Journal of Geophysical Research: Planets, 2022, 127. doi:10.1029/2022JE007286.
6. Mahieux A. et al. Densities and temperatures in the Venus mesosphere and lower thermosphere retrieved from SOIR on board Venus Express: Retrieval technique // Journal of Geophysical Research, 2010, 115. doi:10.1029/2010JE003589.
7. Mahieux et al. The SOIR/Venus Express species concentration and temperature database: CO₂, CO, H₂O, HDO, H₃₅Cl, H₃₇Cl, HF individual and mean profiles // Icarus, 2023. Volume 405. doi:10.1016/j.icarus.2023.115713.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский Научный Фонд", грант 23-12-00207

Сравнение результатов моделирования водяного пара в атмосфере Марса моделью МАОАМ с данными прибора ACS миссии ExoMars за 34, 35 и 36 Марсианские годы

**Мария С. Жарикова¹ , Александр С. Медведев² , Анна А. Федорова¹ , Дмитрий С. Шапошников¹ ,
Денис А. Беляев¹ , Михаил С. Лугинин¹**

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

² Института Макса Планка по Исследованию Солнечной Системы, Германия

mariyazharikova96@yandex.ru

Модель МАОАМ (Martian Atmosphere: Observation and Modeling), также известная как MPI-MGCM (Max Planck Institute Martian general circulation model) - модель общей циркуляции атмосферы Марса, имеющая спектральное динамическое ядро. Модель достаточно успешно предсказывает температурный режим на Марсе, показывая согласие с наблюдательными данными. Гидродинамический блок модели включает схему переноса, микрофизику водяного пара и льда, гетерогенную нуклеацию, седиментацию, фотодиссоциацию и обмен воды с поверхностью, и воспроизводит основные особенности гидрологического цикла Марса, такие как пояс облаков в афелии и перенос водяного пара из северного полушария в южное.

В рамках данной работы произведено моделирование водяного цикла на Марсе для 34, 35 и 36 Марсианских годов. Будет представлена количественная оценка содержания водяного пара в атмосфере, сезонно-высотные и широтно-высотные распределения, а также распределение температуры. Будут представлены сравнения результатов моделирования с усредненными профилями, полученными спектрометром ACS (Atmospheric Chemistry Suite) с космического аппарата ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO).

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 23-12-00207

СЕКЦИЯ 9. РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ в ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ

Председатель: д.ф.-м.н. **Макштас А.П.** (ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия)

Сопредседатель: к.ф.м.н. **Богородский П.В.** (ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия)

Устные доклады

Атмосферные инверсии нижнего уровня в Центральном Арктическом бассейне

Александр П. Макштас¹, Денис Д. Ризе¹, Андрей С. Грубый¹

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

maksh@aari.ru

Высокая повторяемость температурных инверсий - одна из особенностей нижнего слоя атмосферы в полярных районах. Их исследование необходимо для лучшего понимания процессов, обусловливающих изменение климата высоких широт вследствие влияния на тепловой баланс в системе «пограничный слой атмосферы - подстилающая поверхность», усиления роли факторов антропогенного происхождения, а также как одного из возможных механизмов полярного усиления. Данные о вертикальном профиле температуры атмосферы были получены в период работы дрейфующей станции «Северный Полюс - 41» с помощью температурного профилемера МТР-5РЕ. При расчетах основных характеристик инверсионного слоя был использован программный продукт МТР-5РЕ, на основе которого были рассчитаны высоты нижней границы инверсии Zb с температурой Tb и верхней - с соответствующими высотой и температурой Zt и Tb.

На основе данных непрерывных наблюдений высокого пространственно - временного разрешения о температуре нижнего километрового слоя атмосферы, выполненных на дрейфующей станции «Северный Полюс - 41» в 2022 - 2023 г. г., описана внутригодовая изменчивость характеристик приповерхностных инверсий, формирующихся в Центральном Арктическом бассейне (ЦАБ). Приведены статистические оценки характеристик и показано их существенное различие в зимний и летний сезоны, обусловленное особенностями радиационного режима, облачности и состояния ледяного покрова. Выявлено увеличение повторяемости приподнятых инверсий при существенном уменьшении их глубины и мощности в зимний период 2022 - 2023 г. г. по сравнению с аналогичным периодом 1981 - 1987 годов.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Росгидромет", грант НИТР 5.4.1

Влияние фазового состава снега на возникновение в нём конвекции воздуха

Петр В. Богородский¹, Ольга Р. Сидорова¹

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

bogorodski@aari.ru

Рассмотрена задача возникновения термической конвекции в снежном покрове плавающего льда. Обычно она решается в рамках так называемой однотемпературной (классической) модели с одним уравнением теплопроводности, поскольку предполагает равенство температур жидкой (паровоздушной) и твёрдой (ледяной) фаз снега, несмотря на разницу их теплопроводностей примерно в сто раз. Здесь задача устойчивости, по-видимому, впервые для снега, исследуется в рамках более общей, двухтемпературной модели, использующей уравнения теплопроводности для каждой фазы. Такой подход учитывает интенсивность межфазного теплообмена, разность теплофизических свойств воздуха и льда, пористость снега, а также гидрологическую специфику задачи. Предложены два варианта граничных условий, соответствующих непроницаемой (из-за смерзания поверхностных кристаллов льда) и проницаемой для воздуха верхней границей. Получены аналитические решения задачи, проведено их параметрическое исследование, выполнено сравнение оценок процесса одно- и двухтемпературной моделями, определены области применимости. Показано, что учёт теплообмена фаз вызывает рост порога неустойчивости по сравнению с классическим подходом в несколько раз. С использованием термодинамической модели снежно-ледяного покрова, позволяющей рассчитать температуру границ слоя снега по данным стандартных метеонаблюдений, выполнено сравнение данных моделирования с оценками характеристик процесса для реальных условий энергообмена моря и атмосферы в проливе Шокальского (архипелаг Северная Земля).

Исследование проведено при поддержке:

1. "Росгидромет", грант НИТР 5.1.4

Параметризация нагрева мезопаузы за счет поглощения ИК излучения серебристыми облаками

Арсений В. Соколов^{1,2} , Елена Н. Савенкова² , Андрей В. Коваль¹ , Карина В. Кравцова^{3,2} , Николай М. Гаврилов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Российский государственный гидрометеорологический университет

³ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

anigahuchi@yandex.ru

Статья посвящена разработке параметризации нагрева верхней атмосферы за счет поглощения потоков ИК радиации кристаллами серебристых облаков (СО). Особенностью такой параметризации является учёт теплофизических свойств льда и взаимодействия облачных частиц с окружающей средой. Параметризация использует данные о пространственно-временном распределении ледяных кристаллов в верхней атмосфере летнего полушария на основе спутниковых спектрометрических измерений (SOFIE/ AIM). Данная параметризация позволяет рассчитать вклад СО в термический баланс мезосферы-нижней термосферы (МНТ). Тестовые расчеты производились с использованием фоновых распределений температуры SD/WACCM-X для различных условий, включающих максимальные положительные/отрицательные аномалии температуры приполярной МНТ в конце мая. Полученные результаты показывают, что СО могут оказывать существенный вклад в тепловой баланс верхней атмосферы, сопоставимый с нагревом, вызванным диссипацией гравитационных волн. В частности, показано, что, если средняя температура в МНТ области выше климатической нормы, рассчитанный в параметризации нагрев зависит от содержания водяного пара: при увеличении содержания водяного пара нагрев в мае увеличивается до 3 (К/сут). При понижении фоновой температуры зависимость от содержания водяного пара ослабевает. При отрицательных аномалиях температуры в МНТ интенсивность нагрева может доходить до 4.5 (К/сут), а область нагрева расширяется в более низкие широты, до 50° с. ш. Параметризация может использоваться в моделях глобальной атмосферной циркуляции с целью изучения цепочки обратных связей, обеспечивающей охлаждение приполярной МНТ выше слоя СО.

Характеристики облаков в Арктике: сравнительный анализ спутниковых данных и экспедиционных данных NABOS

Александра И. Нарижная¹, Александр В. Чернокульский^{1,2}, Дмитрий Г. Чечин¹, Ирина А. Репина¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Институт географии Российской академии наук

augustea@mail.ru

Облака играют важную роль в климатической системе Арктики, обладая существенным отепляющим эффектом практически во все месяцы. Однако, существующие количественные оценки облачно-радиационных характеристик по разным данным существенно различаются.

В данной работе проанализированы характеристики облачности, радиационных потоков, а также облачно-радиационных эффектов (форсинга) на поверхности на основе трех полярных экспедиций NABOS (Nansen and Amundsen basins observation system) в центральных районах Северного Ледовитого океана. Рейсы проводились в августе-сентябре 2013, 2015 и 2018 годов на НЭС "Академик Федоров" и НЭС "Академик Трешников". Облачно-радиационные характеристики, рассчитанные по данным экспедиционных наблюдений, сравниваются со спутниковыми данными CERES. Радиационные параметры рассчитывались для атмосферы над морскими акваториями отдельно для регионов с разной сплошностью морского льда (ICE): ICE <5% (открытая вода); ICE от 5% до 95% (переходная сплошность льда); ICE>95% (сплошной лед).

Установлено, что спутниковые данные демонстрируют более разорванную облачность по сравнению с наблюдениями NABOS, а также практически полное отсутствие эпизодов ясного неба. Это расхождение приводит к несколько менее выраженному отепляющему эффекту облачности, но значительно более слабому охлаждающему эффекту в данных CERES по сравнению с NABOS. В результате судовые наблюдения NABOS показывают, что облака вносят вклад в охлаждение поверхности: суммарный облачно-радиационный эффект $-10,1 \text{ Вт м}^{-2}$, тогда как спутниковые данные CERES для тех же дат и регионов показывают отепляющее воздействие: суммарный облачно-радиационный эффект $30,2 \text{ Вт м}^{-2}$.

Проанализирована согласованность данных NABOS и CERES в зависимости от различных внешних параметров (сплошность морского льда, высота Солнца, характеристики облаков). Наибольшие расхождения между данными отмечены для переходной концентрации льда: над полностью открытой или полностью ледовой поверхностью согласие выше. Получена разнонаправленная статистически-значимая зависимость потоков (разная для коротко- и для длинноволнового потока) от балла облачности. Выявлена зависимость от фазы облаков: в целом, для ледяных облаков соответствие между потоками выше, чем для водных.

Исследование проведено при поддержке:

1. "РНФ", грант № 23-47-00104

Антропогенный поток тепла, обусловленный отопительным периодом в городах, расположенных на территории РФ севернее 57°с.ш. и в Сибири

Виктор А. Фролькис^{1,2}, Игорь А. Евсиков^{3,1}

¹ Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Вoeйкова

² Санкт-Петербургский государственный экономический университет

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

VFrolkis@gmail.com

Предлагается альтернативный способ оценки доли антропогенного потока тепла (АПТ), обусловленного отоплением, по схеме «снизу-вверх», когда АПТ вычисляется для каждого здания на основе действующих строительных норм по теплоизоляции зданий и их энергопотреблению. АПТ зависит от разности между температурами воздуха внутри и снаружи от здания. Полный АПТ от населенного пункта получается суммированием по всем зданиям. Для этого на основе веб-картографической платформы OpenStreetMap, сайта Яндекс Карты и ГИС ЖКХ построены модели застройки для 33 городов и поселений, расположенных в России севернее 57°с.ш., а также в Сибири. Для них рассчитываются объемы и площади ограждающих конструкций зданий.

Для городов, расположенных в высоких широтах выделяемое антропогенное тепло в ноябре, декабре и январе может быть соизмеримо с количеством поглощенной солнечной радиацией. В случае безоблачного неба на широтах 60, 64 и 68°с.ш. суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность составляет: за ноябрь 97, 56, 14; за декабрь 39, 0 и 0 и за январь 70, 29 и 0 МДж/м². Среднемесячные оценки АПТ, рассчитанные за отопительный период по среднесуточным температурам в течение 2013–2023 гг. для урбанизированной территории городов, расположенных на широтах 61–62°с.ш. (например, Сургут и Якутск), 64,5–66,5°с.ш. (Архангельск и Салехард), 67,5–67,6 (Воркута, Апатиты и Нарьян-Мар) и 68,5–69,5°с.ш. (Мурманск и Норильск), находятся соответственно в интервалах: в ноябре 1,58–5,28, 1,07–3,41, 1,14–2,99 и 1,25–5,79 МДж/м²; в декабре 1,82–6,71, 1,35–3,95, 1,27–3,41 и 1,44–6,85 МДж/м²; в январе 2,00–6,82, 1,46–4,28, 1,35–4,88 и 1,60–7,14 МДж/м². Эти оценки показывают важность учета АПТ в северных широтах.

Рассмотрены три алгоритма вычисления АПТ. Первый использует понятие нормативного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Второй основан на нормируемом значении удельной теплозащитной характеристики здания. Третий использует нормируемую удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Оценивается АПТ с административной и урбанизированной территорий, причем достигает максимального значения на урбанизированной территории, характеризующейся наиболее плотной застройкой и не превышающей, как правило, 10% от административной территории города. Выделяемая при средней температуре отопительного периода плотность АПТ с урбанизированной территории и оцениваемая по трем алгоритмам соответственно находится в диапазонах 13,7–19,1, 21,7–31,5, 31,8–55,9 Вт/м². Антропогенная энергия (в ПДж) с урбанизированной территории по всем алгоритмам заключена в интервале, например, для Санкт-Петербурга 66,8–151,2; Мурманска, Норильска, Апатитов, Нарьян-Мара и Дудинки 32,9–69,9; Новосибирска и Екатеринбурга 20,3–55,0; Челябинска, Красноярска, Омска, Перми и Тюмени 12,8–38,2; Сургута и Якутска 5,9–16,8; Архангельска 4,7–11,2; Воркуты, Салехарда, Тикси и Диксона 21,5–56,4.

Плотность АПТ в направлении к подстилающей поверхности от нижней границы зданий в среднем в течение отопительного периода для населенных пунктов, расположенных севернее 66,5°с.ш., находится в интервале 1,20–1,96 Вт/м². Приведены значения антропогенной энергии, усредненные за отопительные периоды 2013–2018 и 2018–2023 гг., а также и карты пространственного распределения плотности АПТ при средней температуре отопительного периода.

Учитывая неопределенность в теплофизических параметрах зданий, предлагается использовать усредненную оценку АПТ, полученную по всем алгоритмам.

Исследование динамики экстремальности климата в Арктическом регионе

Людмила И. Коломеец^{1,2,3}, Камиль Ф. Назмутдинов^{1,4}

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

² Санкт-Петербургский государственный университет

³ ООО "Институт радарной метеорологии", Россия

⁴ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

liudusik88@mail.ru

Оценка динамики экстремальности климата в полярном регионе проводилась на основе индексов, разработанных группой экспертов в области исследования экстремальности климата. [1] Данные индексы могут выступать в роли предикторов существенных климатических изменений.

Было рассчитано 27 индексов экстремальности климата. Расчет основан на суточных значениях приземной температуры воздуха и количества осадков по данным реанализа ERA5 с шагом сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ с 1979 по 2014 гг. Получен межгодовой ход с проверкой на 5%-уровне значимости. Расчитана разница осреднённых за два пятнадцатилетних периода значений индексов.

Полученные значения индексов можно условно разделить на 4 категории [2]:

1 - абсолютные индексы, измеряющиеся в абсолютных величинах, к ним относятся: максимум из максимальных суточных температур; минимальное значение из максимальных суточных температур; максимальное значение из минимальных суточных температур; минимум из минимальных суточных температур; среднегодовая амплитуда температур; максимальное количество однодневных осадков; максимальное количество осадков за 5-дневные периоды; годовое количество осадков; индекс интенсивности осадков.

2 - пороговые индексы, которые подсчитывают количество дней, превышающих фиксированный порог, среди них выделяют следующие: количество дней с заморозками (морозные дни); количество жарких дней, количество дней с устойчивым морозом (ледяные дни); количество тропических ночей; длина вегетационного периода; годовое количество дней с осадками; годовое количество дней с осадками больше или равными 10 мм; годовое количество дней с осадками больше или равными 20 мм.

3 - пороговые индексы на основе процентиляй, указывающие на показатели превышения ниже или выше определённого процента, полученного из базового периода (процент дней, когда минимальная суточная температура ниже 10-го процента; процент дней, когда максимальная суточная температура ниже 10-го процента; процент дней, когда минимальная суточная температура превышает 90-й процентиль; процент дней, когда максимальная суточная температура превышает 90-й процентиль. годовое количество осадков, когда суточные осадки превышают 95-й процентиль, годовое количество осадков, когда суточные осадки превышают 99-й процентиль)

4 - индексы продолжительности, которые представляют продолжительность определенных периодов, основанных на абсолютном или процентильном пороге (максимальная продолжительность сухого периода; количество дней, с наблюдавшимися волнами холода; максимальная продолжительность засушливых дней; количество дней с наблюдавшимися волнами тепла).

Результаты работы могут быть использованы для разработки адаптационных стратегий в ключевых секторах экономики, таких как сельское хозяйство, энергетика и здравоохранение, где экстремальные температуры и осадки оказывают значительное влияние на устойчивость систем.

- Peterson T.C. Climate Change Indices // WMO Bulletin. 2005. Vol. 54. № 2. P. 83-86.
- Kim Y.-H. et al. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices // Weather and Climate Extremes. 2020. Vol. 29. P. 100269. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100269.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 23-77-30008

Особенности выпадения атмосферных осадков под влиянием г. Санкт-Петербург

Людмила И. Коломеец^{1,2,3}, Иван А. Тюриков³

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

² Санкт-Петербургский государственный университет

³ ООО "Институт радарной метеорологии", Россия

liudusik88@mail.ru

Мегаполис влияет на осадки разнонаправленно. Как правило, ослабление отмечается над городом осадков малой и средней интенсивности, а усиление — наиболее интенсивных. К основным механизмам влияния города на осадки можно относится: эффект городского острова тепла (усиленные восходящие потоки, приводящие к увеличению образования облаков и осадков), специфический городской ландшафт, высокая концентрация аэрозолей. Помимо этого, на мегаполис Санкт-Петербург особое влияние оказывают близость Ладожского озера и Финского залива.

Если влажность воздуха недостаточна для образования облаков, мощные конвективные потоки, образующиеся над центральной частью города, являются препятствием для адвективных воздушных потоков, поступающих в наветренную часть города. Приходящие массы воздуха испытывают дополнительный вынужденный подъем, вследствие чего образуется облачность и выпадают осадки.

Высокая относительная влажность атмосферного воздуха способствует повышенной конвективной неустойчивости и загрязненности воздушных масс над городом, что благоприятствует образованию облачности. В процессе преобразования облаков из кучевых в мощные кучевые и кучево-дождевые происходит их смещение под влиянием преобладающего переноса воздушных масс. Осадки выпадают преимущественно в подветренных районах города и за его пределами.

Последнее время остро стоит задача прогноза случаев выпадения осадков над городом, когда зона осадков «разрывается» над городом и когда, наоборот, «резко усиливается». Например, один из таких «особых» случаев наблюдался 31 июля 2024 года. Над городом наблюдались достаточно сильные восходящие потоки, но при этом облачность разрушалась, а не усиливалась. Среди интересных случаев для моделирования происходящих процессов также были выбраны следующие даты: 5 января 2023 г, 22 июня 2023 г и др. (где явно наблюдается либо эффект ослабления, либо эффект усиления осадков над городом).

Численные эксперименты проводились на основе модели WRF-ARW.

В результате проведенной работы создан архив случаев выпадения атипичных осадков, проведен синоптический анализ ситуаций, численные эксперименты по моделированию выбранных случаев и подготовлены карты радиолокационных характеристик для понимания триггерных механизмов поведения осадков над городом и в ближайших пригородах.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 23-77-30008

Постерная сессия

Временная изменчивость альбедо ледников архипелага Шпицберген, на примере ледника Альдегонда

Ульяна В. Прохорова¹, Антон В. Терехов¹, Борис В. Иванов

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

uvprokhorova@aari.ru

В настоящем исследовании рассмотрена временная изменчивость отражательных свойств поверхности — альбедо ледника Альдегонда (Земля Норденшельда, остров Западный Шпицберген) на основе спутниковых снимков оптического спектра за период 2016–2024 гг. Изучение альбедо имеет ключевое значение для понимания системы обратных связей в балансе энергии и массы низкорасположенных ледников архипелага Шпицберген.

Для оценки альбедо поверхности использовались спутниковые снимки Sentinel-2 уровня L2A с пространственным разрешением 10–20 метров за август, когда наблюдается наиболее интенсивная аблация ледника. Предварительная обработка снимков включала расчёт интегрального альбедо на основе эмпирических методик, учитывающих спектральные характеристики каналов и оптические свойства атмосферы. В результате были получены пространственно-распределённые значения альбедо по всей площади ледника, при этом теневые области были исключены из дальнейшего анализа.

Величины ставшего слоя льда за каждый сезон 2016–2024 гг. были измерены по четырнадцати аблационным рейкам. Значения приходящей солнечной радиации и температуры воздуха были взяты из архива микроклиматических наблюдений на леднике Альдегонда по данным автоматической метеорологической станции.

В результате анализа выявлена тенденция к снижению альбедо поверхности ледника Альдегонда с 2016 по 2024 год. Межгодовая изменчивость аблации в наибольшей степени объясняется изменениями температуры воздуха и альбедо. Между аблацией и температурой воздуха установлен положительный коэффициент линейной корреляции 0.77. Альбедо также оказалось значимым фактором, с коэффициентом корреляции −0.70, свидетельствующим о том, что рост аблации связан с уменьшением альбедо поверхности. Положительная связь была выявлена и между аблацией и коротковолновым радиационным балансом (коэффициент корреляции 0.76), что подчёркивает важность отражательных характеристик поверхности в процессах таяния.

На основании проведённой регрессионной оценки был предложен двухфакторный подход для расчёта аблации поверхности ледника в зависимости от альбедо и средней температуры воздуха за август:

$$\text{Аблация} = 2.37 + 0.15 \times \text{температура воздуха} - 3.52 \times \text{альбедо},$$

где 2.37 — свободный член, 0.15 — коэффициент при температуре воздуха, а −3.52 — коэффициент при альбедо. Важной оговоркой является, что при нулевых и отрицательных температурах аблация считается равной 0. Подобная модель объясняет 67.4% дисперсии аблации ($R^2 = 0.67$). Оставшиеся 32.6% дисперсии, вероятно, связаны с влиянием других факторов, таких как характеристики снежного покрова, ветровой режим и локальные метеорологические условия.

Полученные результаты подтверждают ключевую роль альбедо и коротковолнового радиационного баланса в процессе таяния низкорасположенных ледников.

Классификация условий облачности во время полярной ночи по данным наблюдений на дрейфующих станциях в Арктике

Ирина А. Махотина¹, Дмитрий Г. Чечин²

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

ir@aari.ru

Во время полярной ночи в Арктике облачность, взаимодействуя с длинноволновой радиацией, оказывает влияние на радиационный баланс морского ледяного покрова, уменьшает эффективное излучение поверхности и увеличивает встречное излучение атмосферы по сравнению с аналогичными измерениями при ясном небе. Визуальное определение облачности на дрейфующих станциях «Северный полюс» (СП) в 1950-1990 гг. показало наличие максимумов в распределении повторяемости баллов облачности для ясного неба (0-2 балла) и сплошной облачности (8-10 баллов). Начиная с 2007 года использование на дрейфующих станциях облакометра, оснащенного импульсным диодным лазером, позволило улучшить временное разрешение и получить информацию о наличии облаков в зените над прибором с шагом 15 секунд. На основе данных измерительной кампании SHEBA авторы (Stramler et al, 2011) выявили наличие в зимний период двух мод в распределении повторяемости длинноволнового радиационного баланса и, поставив их в соответствие с состоянием ясного неба ($<= -30 \text{ Вт}/\text{м}^2$) и сплошной облачности ($>= -10 \text{ Вт}/\text{м}^2$), показали, что в зависимости от наличия или отсутствия облаков пограничный слой атмосферы (АПС) может находиться в двух характерных состояниях: при ясном небе АПС устойчивый, более холодный, а при сплошной облачности - неустойчивый, более теплый, с сильным ветром.

Задачей данного исследования является определение наиболее надёжного способа для разделения случаев ясного неба и сплошной облачности в полярную ночь. Приводится анализ состояния приземного слоя атмосферы в Арктике в период с ноября по февраль при наличии и отсутствии облаков по результатам наблюдений на СП-37, 39, 40 (с 2009 по 2013 гг.). Разделение по категориям (сплошная облачность или ясное небо) проводилось тремя способами: на основе визуальных наблюдений, по значению длинноволнового баланса и по облакометру. Наиболее удачным способом разделения условий облачности считался тот, при котором разность между средними значениями рядов метеонаблюдений при ясном небе и сплошной облачности была наибольшей, а стандартное отклонение по соответствующей выборке - наименьшим. В соответствии с условиями облачности, определяемыми одним из трёх способов, были выбраны массивы среднечасовых метеорологических параметров (температура воздуха и поверхности и их разность, скорость ветра, атмосферное давление, потоки и баланс длинноволновой радиации, турбулентный поток явного тепла, параметр устойчивости Монина-Обухова). При решении задач классификации в работе также использовались методы дискриминантного анализа.

На станциях СП-37 и СП-39 в зависимости от условий облачности более выраженные отличия получены с использованием данных облакометра для всех параметров приземного слоя атмосферы, за исключением потока явного тепла, а также длинноволнового баланса, по которому настраивался фильтр значений в одном из вариантов расчёта. На СП-40 наилучшие результаты были получены преимущественно способом разделения условий облачности по длинноволновому балансу. Данные о сплошной облачности на СП-40, полученные с помощью облакометра, показывают меньший поток встречного излучения атмосферы, большее радиационное выхолаживание поверхности и более низкую температуру воздуха по сравнению с другими станциями и по сравнению с группировкой данных по балансу длинноволновой радиации, что может быть связано с особенностями фазового состава облаков. Визуальные наблюдения за облачностью не показали устойчивого преимущества ни на одной из выбранных станций.

Опыт использования влагомера на дрейфующей станции "Северный Полюс - 41"

Геннадий Н. Ильин¹, **Александр П. Макштас²**, Владимир Ю. Быков¹, Андрей С. Грубый²,
Александр М. Шишикин¹

¹ Институт прикладной астрономии Российской академии наук

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

igen@iaaras.ru

В состав научного оборудования экспедиции СП-41 входит радиометрический комплекс дистанционного зондирования - РМС-2, предназначенный для получения в режиме реального времени данных о влажностных параметрах атмосферы - интегральном содержании водяного пара в столбе единичной площади ($\text{г}/\text{см}^2$) и водозапасе облаков ($\text{кг}/\text{м}^2$). Отсюда и смысловое название прибора- влагомер. Исходными данными для расчёта влажностных параметров атмосферы являются результаты измерения мощности излучения атмосферы в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн. Результаты измерений, обновляющиеся каждые 10 с, могут быть использованы, в том числе, для исследования внутрисуточных вариаций водного состава атмосферы. Получаемые РМС-2 данные являются дополнением к разреженным данным, получаемым средствами аэрологического зондирования.

Функционально РМС-2 представляет собой двухканальный СВЧ радиометр, измеряющий мощность сигнала, излучаемого земной атмосферой на частотах $f_1=20.7$ ГГц и $f_2=31.4$ ГГц в направлении "зенит". В отличие от аналогичного по назначению прибора, установленного на научно-исследовательском стационаре ААНИИ «Ледовая база "Мыс Баранова", влагомер дополнен средством автоматической калибровки.

Прибор запущен в работу 25.08.2023 г. Представлены обработанные результаты измерений на интервале 137 суток. По результатам работы выполнена оценка качества работы систем прибора.

В процессе эксплуатации выявлена необходимость доработки конструкции привода антенной системы водомера с целью работы в условиях повышенных (до 50 м/с) ветровых нагрузок. Указанный недостаток устранён в период подготовки к экспедиции СП-42.

Поляриметрическое зондирование облаков в полярных широтах

Виктория А. Фалалеева¹, Борис А. Фомин², Александр В. Чернокульский¹, Алексей Е. Мамонтов¹, Арсений Ю. Артамонов¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Центральная Аэрологическая Обсерватория

victory@ifaran.ru

Облачность играет существенную роль в радиационном балансе полярных широт, наиболее чувствительных к климатическим изменениям. Дистанционное зондирование облаков в полярных районах представляет значительную сложность из-за низкого видимого и температурного контраста с подстилающей поверхностью. Однако поляризация излучения, возникающая при рассеянии на облачных частицах, может служить ключевым параметром для восстановления их микрофизических и оптических характеристик.

Для оценки потенциала поляриметрических измерений проведены численные эксперименты с использованием модели переноса излучения Fast Line-by-Line Model (FLBLM), рассчитывающей параметры Стокса уходящего солнечного и теплового излучения в видимом, ближнем и тепловом ИК-диапазонах. Исследованы различные сценарии облачности (оптическая толщина, высота, фазовый состав) и типы подстилающей поверхности (лёд/открытая вода). Результаты показали, что линейная поляризация солнечного излучения демонстрирует чувствительность ~10% к изменению облачной структуры, сохраняя стабильный уровень даже при снижении альбедо и интенсивности сигнала, регистрируемого спутником. Тепловое излучение проявляет слабую поляризацию (~1%), заметную лишь на лимбовых трассах, что ограничивает его применение. Во всех численных экспериментах использовалось высокое спектральное разрешение (0.1 см^{-1} и лучше), что способствует послойному анализу атмосферы, поскольку позволяет выделять вклад различных высот за счёт разной глубины проникновения излучения в спектральных линиях. В частности, высокое спектральное разрешение помогает исключить влияние подстилающей поверхности и нижних слоёв атмосферы в сильных полосах поглощения атмосферных газов.

Современные спутниковые системы редко сочетают высокое спектральное разрешение с поляриметрическими возможностями, что снижает их эффективность для задач облачного зондирования. Разработка новых приборов, обладающих обоими свойствами, могла бы значительно повысить точность восстановления параметров облачности в полярных районах. Модель FLBLM может быть использована для оптимизации параметров будущих спутниковых экспериментов, включая выбор спектральных диапазонов и геометрии наблюдений. Таким образом, пассивное поляриметрическое зондирование обладает значительным потенциалом для мониторинга облачности в полярных широтах, но требует дальнейшего развития инструментальной базы.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-35-00585.

Исследование проведено при поддержке:

1. "РФФИ", грант 16-35-00585

СЕКЦИЯ 10. ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СОДЕРЖАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИ и ЭКОЛОГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ГАЗОВ и АЭРОЗОЛЕЙ в ТРОПОСФЕРЕ

Сопредседатели: д.ф.-м.н. **Бакланов А.А.** (ВМО, Швейцария, РГГМУ, Санкт-Петербург, Россия), к.ф.-м.н. **Макарова М.В.** (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия), к.ф.-м.н. **Ионов Д.В.** (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Устные доклады

Оценка взаимосвязи солнечно-индуцированной флуоресценции с параметрами окружающей среды для различных экосистем юга Западной Сибири по данным реанализа и спутниковых наблюдений

Татьяна Б. Журавлева¹, Алексей В. Скороходов¹

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

ztb@iao.ru

Валовая первичная продукция (GPP, gross primary production) является ключевой характеристикой глобального углеродного баланса. В настоящее время для получения информации о GPP в региональном и глобальном масштабе широко используются подходы, основанные на данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Первая группа методов основана на применении установленных статистических зависимостей между GPP и различными косвенными характеристиками растений, например, вегетационными индексами. Второй подход базируется на использовании модели перераспределения энергии в процессе фотосинтеза, что позволяет связать GPP с фотосинтетически активной радиацией (PAR, photosynthetically active radiation) через эмпирически подобранные коэффициенты. В основе третьего подхода к оценке GPP по спутниковым данным лежит использование информации о солнечно-индуцированной флуоресценции (SIF, solar-induced fluorescence), которая является собственным излучением растений в диапазоне 600-800 нм, возникающим в течение нескольких наносекунд после поглощения солнечного света хлорофиллом. Хотя на флуоресценцию приходится всего 1-2% приходящей PAR, регистрация сигнала со спутника возможна благодаря тому, что пики спектральной SIF (680 и 740 нм) расположены вблизи линий Фраунгофера (687 и 760 нм). Преимуществами использования данного подхода являются его физическая обоснованность и чувствительность к стрессовым условиям растений.

На основе выполненных ранее многочисленных исследований взаимосвязи GPP-SIF показано, что в глобальном масштабе на длительных (не менее месяца) временных интервалах между этими характеристиками наблюдается **практически линейная зависимость**. Однако в региональном масштабе отдельных экосистем соотношение между SIF и GPP может существенно меняться в зависимости от условий окружающей среды, что особенно актуально для регионов с высокой природной неоднородностью – таких, как юг Западной Сибири.

В данной работе рассматривается территория Западной Сибири, включающая Алтайский край, Кемеровскую, Новосибирскую, Омскую и Томскую области. Для выявления ключевых параметров окружающей среды, оказывающих влияние на их фотосинтетическую активность, использованы данные реанализа ERA-5 и различных спутниковых инструментов: температура воздуха на уровне 2 м, температура верхнего слоя почвы, количество осадков, дефицит давления водяного пара, вегетационные индексы, доля поглощенной растениями PAR, потоки прямой и рассеянной PAR, влажность почвы. Рассматриваются месячные значения перечисленных выше характеристик в вегетационном периоде исследуемого региона (май-сентябрь) с 2018 по 2024 год. Вся информация о параметрах окружающей среды приведена к единому пространственному разрешению 0.05°.

Для оценки связи между значениями SIF, восстановленными по данным сенсора TROPOMI (спутник Sentinel-5P), и перечисленными выше характеристиками на данном этапе исследований рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона и их статистическая значимость, а также временные сдвиги кросс-корреляции как для региона в целом, так и отдельных административных областей юга Западной Сибири. Анализ полученных в работе результатов свидетельствует о том, что SIF на рассматриваемых территориях наиболее тесно связан с вегетационными индексами и долей поглощенной растениями PAR. Установлено, что температурный режим в исследуемом регионе более значим для фотосинтетической активности экосистем по сравнению с параметрами увлажненности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Динамика фотосинтеза различных экосистем юга Западной Сибири по спутниковым данным TROPOMI за период 2018-2024 гг

Алексей В. Скороходов¹, Татьяна Б. Журавлева¹

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

vazime@yandex.ru

Фотосинтез является ключевым биологическим процессом на Земле, в ходе которого энергия Солнца используется для синтеза органических соединений из неорганических веществ с выделением кислорода как побочного продукта. В настоящее время одним из наиболее перспективных подходов к мониторингу фотосинтетической активности экосистем в региональном и глобальном масштабе является регистрация флуоресцентного излучения хлорофилла, индуцированного солнечным светом (SIF, solar-induced fluorescence), аэрокосмическими средствами.

Растениями усваивается только часть приходящего солнечного излучения, называемая фотосинтетически активной радиацией (400-700 нм). Поглощаясь хлорофиллом, она расходуется на несколько процессов: фотосинтез (80-90%), рассеяние в виде тепла (5-10%) и флуоресценцию (1-2%). SIF генерируется в течение нескольких наносекунд после абсорбции света в диапазоне длин волн от 600 до 800 нм с пиковыми значениями на 680 и 740 нм. Регистрация столь слабого сигнала со спутника возможна благодаря тому, что пики спектральной SIF расположены вблизи линий Фраунгофера (687 и 760 нм). Однако на практике полоса 680 нм не используется в дистанционном зондировании из-за ослабления излучения в результате его повторного поглощения хлорофиллом при выходе и высокого фона отраженного солнечного света, тогда как оперативные данные SIF (740 нм) применяются для оценки интенсивности фотосинтетической активности экосистем в динамике.

В данной работе рассматривается изменчивость SIF для наиболее распространенных экосистем юга Западной Сибири – региона, который характеризуется высокой природной неоднородностью и выраженной сезонностью. Представлены результаты оценки динамики фотосинтетической активности как для указанной территории в целом, так и административно-территориальных единиц данного региона.

В качестве источника данных SIF используются результаты зондирования юга Западной Сибири сенсором TROPOMI (спутник Sentinel-5P), полученные за период 2018-2024 гг. с мая по сентябрь. Взятая с сервиса ВЕГА-Science, разработанного в ИКИ РАН, карта распределения типов растительности приведена к пространственному разрешению 0.05° для получения статистически обеспеченных месячных данных SIF. Поскольку TROPOMI сканирует земную поверхность с пространственным разрешением 3.5×5.5 км (3.5×7 км до августа 2019 года) с периодичностью орбиты 16 суток, то для получения месячных данных SIF ежедневные значения агрегировались в узлах сетки с радиусом 4.5 км. На основе полученных значений построен сезонный ход этого параметра для различных экосистем целевого региона. Наибольшей и сходной фотосинтетической активностью обладают лиственные леса и луга, а наименьшей – болота. Интенсивность фотосинтеза большинства экосистем юга Западной Сибири достигает пика в июне (реже – в июле), а минимума в сентябре. Особый интерес представляют значительные отклонения фотосинтетической активности от среднего. В частности, в 2020 году значения SIF были минимальными за весь период наблюдения, что предположительно вызвано холодной весной и дефицитом осадков в начале вегетационного периода. Анализ данных для административно-территориальных единиц по отдельности выявил ряд примечательных фактов, таких, как, например, более высокие, чем у лиственных лесов значения SIF для пахотных земель в Кемеровской области, убывающая фотосинтетическая активность всех основных экосистем Томской области за рассматриваемый период и т.д.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Концентрация метана в атмосфере над морями российской Арктики осенью 2023 года

Наталья В. Панкратова¹, Игорь Б. Беликов¹, Валерий А. Белоусов¹, Андрей И. Скороход^{1,2}, Анастасия В. Васильева¹, Марина Д. Кравчишина³, Юрий А. Штабкин¹, Константин Б. Моисеенко¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Университет Вены, Австрия

³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

n_pankratova@list.ru

Повышение температуры в Арктике, происходящее в последние десятилетия и опережающее средние глобальные темпы, представляет угрозу из-за высвобождения крупных залежей углерода, сосредоточенных в вечной мерзлоте Арктики. Мониторинг окружающей среды стал одной из приоритетных задач при оценке рисков для крайне уязвимых арктических экосистем, однако проведение измерений состава атмосферы в столь удаленных регионах, в особенности над акваторией арктических морей, крайне затруднительны. Они ограничиваются продолжительностью навигационного периода, логистическими сложностями отбора проб и приборной базой, необходимой для проведения прецизионных измерений состава атмосферного воздуха. В ходе данного исследования были проведены измерения атмосферной концентрации CH_4 с 9 ноября по 6 декабря 2023 года. Основными районами исследования стали Баренцево море и южная акватория Карского моря. В период исследований концентрация CH_4 в атмосфере находились в диапазоне от 2.018 до 2.127 ppm, со средним значением 2.040 ± 0.014 ppm.

Вариации атмосферного CH_4 в приводном слое, главным образом, были обусловлены метеорологическими условиями, а также географическим положением судна и временем измерений. Так, например, в региональном масштабе, перенос воздушных масс с суши приводил к повышенной концентрации CH_4 , вынос с северных районов Атлантики – к пониженной. Локальные источники определяли более короткопериодные флуктуации значений концентрации CH_4 в приводном воздухе. Совместные измерения содержания CH_4 в морской воде и в атмосфере с высоким разрешением являются критически важными для понимания масштабов эмиссии CH_4 на границе гидросфера-атмосфера, особенно в зимний период, когда в океане увеличивается мощность слоя перемешивания, усиливается конвекция и в атмосферу может попадать большее количество метана из водной толщи. Полученные нами данные могут быть использованы как входные параметры для климатических моделей.

Исследование проведено при поддержке:

1. "РНФ", грант № 25-27-00140

Антропогенная «пыльная мгла» в мегаполисе: изменение состава и концентрации приземного аэрозоля при локальном воздействии

Дина П. Губанова¹, Анна А. Виноградова¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

gubanova@ifaran.ru

Пылевой аэрозоль играет активную роль в процессах, определяющих состав и свойства атмосферы и влияющих на климат Земли, биогеохимию суши и океана [1, 2]. В основном атмосферная пыль имеет природное происхождение и образуется во время пыльных и песчаных бурь в аридных и с semiаридных районах Земного шара. Вклад минеральной пыли в глобальную аэрозольную нагрузку ~ 26 млн тонн [1]. В тропосфере пыль негативно влияет на экосистемы, здоровье и жизнедеятельность населения [3].

Атмосферный перенос частиц пыли из районов пыльных бурь в близлежащие районы зачастую обуславливает возникновение пыльной мглы. Однако в крупных городах, удаленных от регионов-источников эмиссии минеральной пыли, эффект «пыльной мглы» могут вызвать локальные антропогенные источники (объекты строительства и реконструкции). Этому способствуют специфические особенности большого города (особый ветровой режим, глубокие городские каньоны, урбоканьоны, урбоканьоны).

В работе изучается изменчивость концентрации, распределения по размерам и элементного состава аэрозолей в приземном слое атмосферы Московского мегаполиса во время работы близких интенсивных строительных источников, вызывающих эффект «пыльной мглы». Анализируются данные непрерывных наблюдений за составом приземных аэрозолей, осуществляемых в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) в летний период 2021 и 2024 гг. Обсуждаются два эпизода сильного запыления приземного воздуха вблизи пункта наблюдений ИФА РАН в центре Москвы, отличающихся длительностью и мощностью источников [4].

Массовая концентрация аэрозольных частиц PM_{10} во время действия этих пылевых источников неоднократно превышала предельно допустимую концентрацию ПДК: максимально разовую ($300 \text{ мкг}/\text{м}^3$) – до 14-38 ПДКм.р и среднесуточную ($60 \text{ мкг}/\text{м}^3$) – до 5-9 ПДКс.с.

Исследованы дисперсный и элементный состав приземного аэрозоля в центре мегаполиса во время действия локальных строительных источников. Обнаружено сходство функций распределения по размерам частиц аридного аэрозоля в Калмыкии и городского аэрозоля в момент наибольшей интенсивности локальных строительных источников. Выявлено подобие элементного состава городского аэрозоля во время работы строительных источников и аридного аэрозоля Калмыкии в части высокого содержания лиофильных элементов: алюминия (Al), бария (Ba), лития (Li), магния (Mg), натрия (Na), калия (K), кальция (Ca), железа (Fe), фосфора (P), стронция (Sr), тория (Th), урана (U), лантана (La) и др. Однако в городском пылевом аэрозоле зарегистрированы повышенные концентрации, не превышающие значений ПДК, антропогенных потенциально токсичных элементов –металлоидов и тяжелых металлов: вольфрама (W), ванадия (V), молибдена (Mo), никеля (Ni), меди (Cu), цинка (Zn), кадмия (Cd), асбеста (Pb), олова (Sn), сурьмы (Sb), висмута (Bi). Они свойственны дорожной пыли и пылевому аэрозолю Московского мегаполиса.

Обсуждаются оценки мощности подобных локальных строительных источников аэрозолей и негативные факторы их воздействия при проявлении «пыльной мглы» в большом городе.

1. Kok J.F. et al. Nat. Rev. Earth Environ. 2023. 4, 71-86. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00379-5>.
2. Mahowald N.M. et al. Atmos. Chem. Phys. 2010. 10, 10875-10893. <https://doi.org/10.5194/acp-10-10875-2010>.
3. Zhang X. et al. Atmosphere. 2016. 7, 158. <https://doi.org/10.3390/atmos7120158>.
4. Gubanova D.P. et al. Dokl. Earth Sc. 2025. 522, 14. <https://doi.org/10.1134/S1028334X25605681>

Исследование проведено при поддержке:

1. "Госзадание Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук", грант 125020501413-6

Атмосферный перенос пыли из Прикаспия над Европейской частью России: волны тепла и количества осадков в разные сезоны

Анна А. Виноградова¹, Дина П. Губанова¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

anvinograd@yandex.ru

Как показали результаты непрерывных наблюдений за характеристиками атмосферных аэрозолей в ИФА им. А.М. Обухова РАН в 2020-2024 годах, в Московском регионе почти каждый год наблюдаются эпизоды дальнего переноса пыли из аридных и засушливых районов Прикаспия [1], вызывающие аномальный рост концентрации приземного аэрозоля (с превышением среднесуточного значения ПДК для PM_{10}). Пылевая компонента атмосферного аэрозоля играет активную роль в атмосфере, воздействуя на ее состав и радиационный баланс, а также влияет на наземные экосистемы, биогеохимию водных объектов и суши, здоровье и условия жизни человека.

Цель настоящей работы – выявить эпизоды дальнего переноса пыли в атмосфере из юго-восточных регионов через центр Европейской части России (ЕЧР) в разные сезоны на протяжении 12 лет (2014-2025), их общие черты и различия, их влияние на температуру воздуха и количество осадков в центре ЕЧР. Кроме данных ИФА РАН для центра города и пригорода вблизи г. Звенигорода, использованы данные о составе аэрозоля, полученные на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы ГПБУ Мосэкмониторинг [<https://mosecom.mos.ru/>] в разных районах Москвы, а также метеоданные с сайтов [<http://gr5.ru>; <http://pogodaiklimat.ru>]. Пространственные распределения массы пыли в приземном воздухе и в столбе атмосферы, а также AOD₅₅₀ анализировались с помощью ресурсов реанализа MERRA-2 [<http://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>].

Частота эпизодов появления пыли из Прикаспия в Московском регионе распределена по рассматриваемым годам неравномерно, длительность таких эпизодов также различна (рассматривали от 3 до 10 суток). Наиболее мощные (длительные и дальние) эпизоды наблюдаются весной и осенью. Два раза (ранней весной и зимой) наблюдались выносы пыли из Прикаспия через центр в арктические районы ЕЧР, где при этом изменялся цвет выпадающего снега [2,3].

При переносе пыли и тепла из юго-восточных районов в приземном воздухе в центре ЕЧР происходит не только увеличение концентрации грубодисперсного аэрозоля PM_{10} ($>ПДК=60 \text{ мкг}/\text{м}^3$), но также изменение оптических свойств атмосферы в целом. Кроме того, в эти месяцы меняются, по сравнению с месячной климатической нормой, температура воздуха (на 2.8 и 2.1 °C) и количество осадков (на -13.3 и +5.7 мм) – в теплое и холодное время года, соответственно. Соотношение массы пыли, распространяющейся в атмосфере внутри приземного слоя перемешивания и выше него, также различается по сезонам в соответствии с вариациями эффективности вертикальной конвекции в нижней тропосфере.

1. Виноградова А.А. и др. Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 6. С. 453-460.
<https://doi.org/10.15372/AOO20240602>
2. Шевченко В.П. и др. ДАН. 2010. Т. 431. №. 5. С. 675-679.
3. Губанова Д.П. и др. ДАН. Науки о Земле. 2024. Т. 519, № 2. С. 132-139.
<https://doi.org/10.31857/S2686739724120171>

Исследование проведено при поддержке:

1. "Госзадание Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук", грант 125020501413-6

Постпроцессинг численных прогнозов концентраций приземного озона и твердых взвешенных частиц в московском регионе с применением моделей машинного обучения

Данил В. Борисов¹

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

lbj23.98@mail.ru

Концентрации приземного озона (O_3) и твердых взвешенных частиц (PM_{10}) являются по данным Всемирной Организации Здравоохранения приоритетными показателями при оценке качества воздуха [1]. Современное прогнозирование качества воздуха основано на расчетах концентраций химическими транспортными моделями (ХТМ). Верификация прогнозов ХТМ проводится с использованием данных измерений автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА). Для повышения качества прогнозов корректируются параметризации ХТМ, исходные данные (препроцессинг), применяются методы статистического постпроцессинга [2]. Особую актуальность представляют прогнозы концентраций в периоды неблагоприятных для рассеивания загрязнения метеоусловий (НМУ) [3].

Разработан новый инструмент для постпроцессинга прогнозов ХТМ на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Обучение ИНС направлено на минимизацию отклонений прогнозов концентраций от измерений – в обучающей выборке используются часовые прогнозы концентраций и метеопараметров, данные землепользования, в качестве целевой переменной заданы часовые измерения концентраций в соответствующих прогнозам ячейках сетки. В обучающей выборке используются измерения на всех АСКЗА в регионе. Разработаны модели машинного обучения для постпроцессинга численных прогнозов O_3 (ММО- O_3) и PM_{10} (ММО- PM_{10}).

Результаты верификации на независимых выборках продемонстрировали успешность применения разработанных ММО – существенно уменьшены отклонения прогнозов от измерений концентраций O_3 (на 12-43%) и PM_{10} (на 25-62%). Улучшено прогнозирование суточного хода концентраций – коэффициенты корреляции между часовыми прогнозами и измерениями O_3 увеличены с 0.5 (ХТМ) до 0.7-0.9, PM_{10} с 0.1-0.2 (ХТМ) до 0.4-0.6. Разработанные ММО- O_3 и ММО- PM_{10} применимы для улучшения прогнозов ХТМ в периоды повышенных концентраций при НМУ. Показана эффективность ММО-постпроцессинга прогнозов O_3 и PM_{10} в ячейках сетки, на территориях которых не проводятся измерения концентраций. Приводятся результаты применения разработанных ММО к прогностическим полям концентраций O_3 и PM_{10} , рассчитанных ХТМ для территории московского региона.

Исследования проведены в рамках выполнения НИТР 4.9 Плана НИОКР Росгидромета.

[1] WHO global air quality guidelines. Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [Электронный ресурс] // World Health Organization: [сайт]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (дата обращения: 22.02.2025).

[2] Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART / И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев, А.А. Кирсанов [и др.] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 4 (386). – С. 147-170.

[3] Кузнецова, И.Н. Методы прогнозирования метеорологических условий, влияющих на загрязнение приземного воздуха / И.Н. Кузнецова, Ю.В. Ткачева, Д.В. Борисов // Метеорология и гидрология. – 2024. – № 8. – С. 87-103.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации", грант 4.9

Система обратного моделирования для оценки региональных экосистемных потоков углерода по данным спутниковых измерений содержания CO_2

Игорь Б. Коновалов¹, Николай А. Головушкин¹

¹ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

konov@ipfran.ru

Объективные оценки потоков CO_2 между атмосферой и наземными экосистемами требуются для обеспечения надежных климатических прогнозов, а также для решения целого ряда практических задач, связанных, в частности, с реализацией природных климатических решений. Один из основных подходов, применяемых в мире для выработки таких оценок, основан на обратном моделировании, которое предполагает оптимизацию углеродных потоков путем согласования данных измерений и модельных расчетов атмосферного содержания CO_2 при использовании вероятностных методов.

В рамках этого подхода в ИПФ РАН развивается региональная система обратного моделирования RIGGO (Regional inversion of greenhouse gases observations), предназначенная для оценки экосистемных потоков углерода в российских регионах и включающая в себя, в частности, химико-транспортную модель (XTM) CHIMERE, метеорологическую модель WRF, а также модель экосистемного обмена VPRM. В основу системы заложен оригинальный метод обратного моделирования экосистемных потоков углерода по данным спутниковых измерений содержания CO_2 [1]. Важными особенностями метода являются оценка пространственно-распределенных экосистемных потоков углерода путем байесовской оптимизации параметров VPRM (а не непосредственно значений самих потоков), а также снижение чувствительности вырабатываемых оценок к граничным условиям XTM в результате предварительного преобразования входных (измеренных и рассчитанных) данных по содержанию CO_2 при использовании расчетов времени пребывания воздушных масс внутри региона.

Возможности RIGGO были исследованы путем ее применения для оценки углеродного баланса в европейском регионе, охватывающем страны ЕС и Великобританию, а также в Центральной Сибири в теплый период года при использовании данных со спутника OCO-2. В результате найдено, что усвоение системой данных OCO-2 позволяет радикально (в разы) снизить априорную неопределенность оцениваемых экосистемных потоков. При этом тестовые примеры с использованием синтетических и реальных данных по содержанию CO_2 продемонстрировали, что апостериорные оценки углеродных потоков слабо зависят как от априорных оценок параметров VPRM, так и от граничных условий XTM. Найдено также, что полученные апостериорные оценки экосистемных потоков согласуются с независимыми (и при этом вызывающими доверие) оценками для обоих регионов, включая оценки по данным системы CTE-HR (для европейского региона) и данным инвентаризации GFED (для сибирского региона). Кроме того, оптимизация параметров VPRM позволила улучшить согласие рассчитанного содержания CO_2 над территорией западной Европы с данными сети наземных измерений TCCON, а оценок нетто-экосистемного обмена в Сибири – с данными соответствующих измерений методом турбулентных пульсаций на станции ZOTTO.

1. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Mareev E.A. Using OCO-2 observations to constrain regional CO_2 fluxes estimated with Vegetation, Photosynthesis and Respiration Model // Remote Sens. 2025. V. 17, P. 177.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Государственное задание ИПФ РАН", грант FFUF-2024-0034

Применение спутниковых измерений атмосферного содержания CO_2 для диагностики углеродного баланса в Центральной Сибири

Николай А. Головушкин¹, Игорь Б. Коновалов¹

¹ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

golovushkin@ipfran.ru

Существенная доля антропогенных эмиссий основного парникового газа – CO_2 – поглощается наземными экосистемами, что определяет ключевую роль изучения экосистемных потоков углерода (ЭПУ) в контексте исследований климатических изменений. Оценки ЭПУ востребованы также и в прикладных целях – например, при выстраивании национальных стратегий низкоуглеродного развития, а потому получение объективных оценок этих потоков является актуальной задачей как в России, так и во многих других странах мира.

С целью изучения и оценки ЭПУ в мире широко применяются методы обратного моделирования, предполагающие поиск согласования данных измерений атмосферного содержания CO_2 с соответствующими модельными расчетами. В рамках такого подхода наиболее часто применяются глобальные химико-транспортные модели (ХТМ). Однако ввиду низкого пространственного разрешения такие модели едва ли могут обеспечить достаточную точность оценок регионального углеродного баланса, которые становятся все более востребованными в последние годы. С целью получения объективных оценок ЭПУ в регионах России, в ИПФ РАН развивается региональная система обратного моделирования RIGGO (Regional inversion of greenhouse gases observations). Система RIGGO включает в себя модель экосистемного обмена VPRM (Vegetation Photosynthesis and Respiration Model), ХТМ CHIMERE, метеорологическую модель WRF, а также комплекс оригинальных программных блоков для обработки и анализа модельных и измерительных данных [1]. Оценка ЭПУ осуществляется путем оптимизации параметров VPRM.

В рамках данной работы RIGGO была применена для изучения ЭПУ в Центральной Сибири. Найдено, что оптимизация параметров VPRM по данным измерений содержания CO_2 со спутника ОСО-2 привела к более чем двукратному сужению интервала неопределенности априорной интегральной оценки чистой экосистемной продуктивности (NEP) для теплого периода года. Апостериорная оценка NEP была сопоставлена с оценкой по данным инвентаризации GFED, и было найдено, что обе оценки согласуются между собой в пределах доверительных интервалов. Полученные оценки валовой первичной продуктивности (GPP) продемонстрировали хорошее согласие с соответствующими оценками по данным известного спутникового продукта MOD17A2HGF с разницей менее 15%. Для валидации результатов оценки ЭПУ были привлечены данные измерений нетто-экосистемного обмена (NEE) на двух измерительных вышках наблюдательной станции ZOTTO. Оптимизация параметров VPRM позволила улучшить согласие между величинами NEE по данным модельных расчетов и измерений – в частности, уменьшить среднеквадратичное отклонение и увеличить коэффициент корреляции для соответствующих почасовых значений NEE.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Министерство науки и высшего образования РФ", грант 075-15-2024-661

Траекторный анализ распространения углеродосодержащего аэрозоля от пожаров бореальных лесов центральной Сибири с использованием модели FLEXPART.

Анастасия С. Михайлова¹, Сергей С. Власенко¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

st075797@student.spbu.ru

Основными источниками углеродосодержащего аэрозоля на территории центральной Сибири являются пожары бореальных лесов [1]. Продукты горения биомассы в значительной мере состоят из элементарного (ЕС) и органического углерода [2]. С 2006 года на территории центральной Сибири работает фоновая станция ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory), предназначенная для изучения состава атмосферы бореальных экосистем [3]. Для оценки вклада лесных пожаров в общее содержание чёрного углерода в атмосфере был произведен траекторный анализ распространения шлейфов от очагов возгорания до точки наблюдений, а также сравнение экспериментальных и модельных значений.

Для оценок были выбраны три года (2012, 2016 и 2019), поскольку тогда наблюдалась самые высокие значения массовых концентраций по данным со станции ZOTTO за последние 12 лет. В качестве источников чёрного углерода рассматривались термоактивные точки по данным FIRMS NASA со спутника MODIS. Входными метеорологическими данными были выбраны данные оперативного глобального анализа NCEP FNL. Построение прямых траекторий распространения чёрного углерода производилось с помощью лагранжевой дисперсионной модели атмосферного переноса FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion model). Полученные значения массовых концентраций сопоставлялись с локальными экспериментальными данными массовых концентраций ЕС и коэффициента аэрозольного поглощения. Помимо локальных данных со станции были использованы данные реанализа MERRA-2 (были рассмотрены приземные массовые концентрации ЕС).

В результате анализа были получены высокие значения коэффициентов корреляции (порядка 0.85) между массовыми концентрациями по результатам FLEXPART и экспериментальными значениями, а также хорошее качественное совпадение временных периодов повышенных значений для коэффициента аэрозольного поглощения и данных реанализа. Наилучшие совпадения наблюдаются в сезоны с наиболее мощными пожарами, что позволяет говорить о пожарах как о преобладающем источнике чёрного углерода в атмосфере в данные периоды.

Функционирование измерительной аппаратуры обеспечивалось ресурсным центром «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета.

1. Кондратьев К. Я., Григорьев А. А. Лесные пожары как компонент природной экодинамики. // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 279-292.
2. Arneth A., Unger N., Kulmala M., & Andreae M.O. Perspectives: Clean the air, heat the planet? // Science. 2009. V. 326. № 5963. P. 672-673.
3. Heimann M., Schulze E.-D., Winderlich J., Andreae M. O., et al. The Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO): Quantifying large scale biogeochemical changes in Central Siberia. // Nova Acta Leopoldina. 2014. V. 117. № 399. P. 51-64.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант № 24-27-00148

Вклад городского и адвектичного мелкодисперсного аэрозоля в изменчивость PM_{10} в Москве

Ирина Н. Кузнецова¹, Данил Борисов, Екатерина Татаринович, Юлия Ткачева, Елена Лезина

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

labmuza@mail.ru

Сезонная и внутрисуточная концентрация мелких взвешенных частиц (PM_{10}) в приземном воздухе определяется влиянием их источников, в том числе состоянием подстилающей поверхности, но основная доля изменчивости обусловлена воздействием метеорологических процессов. Показан средний годовой и средний суточный ход PM_{10} в срединные сезонные месяцы в Москве по данным наблюдений на сети «Мосэкомониторинг»; обсуждается неоднородность поля PM_{10} в мегаполисе и различия уровней PM_{10} между примагистральными территориями и районами жилой застройки. Показано, что повышение концентрации PM_{10} и достижение критических уровней загрязнения приземного воздуха (аэрозольные эпизоды) наблюдаются в двух типовых ситуациях. Чаще всего - в периоды неблагоприятных для рассеивания примеси метеорологических условий (НМУ), когда PM_{10} увеличивается за счет локальных городских источников.

Аэрозольные эпизоды формируются и под воздействием внешнего фактора - дальнего переноса. Он проявляется при поступлении запыленных воздушных масс из районов почвенной засухи, из пустынных районов ветрового подъема мелких частиц, в частности из Прикаспийского региона и западного Казахстана, а также при переносе пирогенного аэрозоля из районов природных пожаров. Перенос мелких частиц на большие расстояния обеспечивают специфические атмосферные процессы, как правило, это западные периферии обширных антициклонов с сопутствующими мезоструйными течениями в нижнем 2-х километровом слое. Приводятся примеры аномального повышения температуры в верхней части пограничного слоя как результат прямого нагрева переносимого аэрозоля. Отмечается, аэрозольные эпизоды за счет дальнего переноса фиксируются в Москве весной и осенью, а эпизоды локального загрязнения после схода снежного покрова - в сухую погоду с апреля по октябрь.

Для идентификации НМУ применяется разработанный метеорологический показатель рассеивания загрязнения (МПРЗ), основанный на количественной оценке влияния скорости переноса в нижней части атмосферного пограничного слоя, термического перемешивания и осадков. Используя рассчитанные по данным численной модели COSMO-RuENA6.6 названные параметры выполняется прогнозирование МПРЗ, включающего тип метеоусловий, способствующих накоплению примеси в приземном воздухе. Прогнозирование концентраций PM_{10} на территории московского региона в Гидрометцентре России осуществляется в рамках действующей технологии численных расчетов с использованием химических транспортных моделей (ХТМ) CHIMERE и COSMO-RuART с шагом сетки 2 км. Приводятся показатели качества численных прогнозов PM_{10} на основе ХТМ. Отмечается, аэрозольные эпизоды городского загрязнения в Москве ХТМ предсказывают удовлетворительно в отличие от эпизодов дальнего переноса как следствие отсутствия в ХТМ-технологии учета нерегулярных эмиссий взвешенных частиц природного происхождения в удаленных регионах, приводятся примеры аэрозольного загрязнения PM_{10} в Москве при НМУ и при дальнем переносе, подтверждаемый траекторным анализом.

Исследования проведены в рамках выполнения НИТР 4.9 Плана НИОКР Росгидромета

Исследование проведено при поддержке:

1. "ФГБУ Гидрометцентр России", грант НИТР 4.9 Плана НИОКР Росгидромета

Оценки долговременных трендов водозапаса не дождевых облаков на основе многолетних микроволновых измерений вблизи Санкт-Петербурга

Владимир С. Костцов¹ , Мария В. Макарова¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

v.kostsov@spbu.ru

Анализируется 12-летний (2013-2024) временной ряд наземных дистанционных микроволновых измерений водозапаса не дождевых облаков и оцениваются линейные тренды водозапаса для различных выборочных подмножеств данных. Эти подмножества включают круглосуточные, дневные иочные измерения. Для оценки трендов применяются два подхода. Первый подход основан на линейном регрессионном и корреляционном анализе и используется для обработки среднегодовых величин. Второй подход основан на сочетании метода Ломба-Скаргла с методами перекрестной проверки и бутстреппинга и используется для обработки ряда среднесуточных величин. Наиболее выраженный общий тренд за период 2013-2024 гг. выявлен для дневных значений водозапаса облаков и составляет $-0.0011 \pm 0.00015 \text{ кг м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Данный тренд обусловлен в основном трендом водозапаса для теплого сезона (май-июль, $-0.0014 \pm 0.00015 \text{ кг м}^{-2} \text{ год}^{-1}$), который значительно больше тренда для холодного сезона (ноябрь-январь, $-0.00064 \pm 0.00026 \text{ кг м}^{-2} \text{ год}^{-1}$). Результаты также указывают на уменьшение количества измерений при ясном небе за период 2013-2024 гг.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 24-27-00016

Классификация и повторяемость всплесков образования наночастиц в атмосфере прибрежной зоны оз. Байкал

Вадим Цыдыпов¹, Александр Заяханов¹, Галина Жамсуева¹, Аюна Дементьева¹, Тумэн Бальжанов¹, Алексей Старикиов¹

¹ Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

tsydypov@inbox.ru

В работе приведены классификация и статистика повторяемости всплесков образования наночастиц в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал на научном стационаре «Боярский» ИФМ СО РАН. Измерения концентрации и распределение аэрозольных частиц по размерам в диапазоне от 5 нм до 1 мкм проводились с помощью диффузионного спектрометра аэрозолей ДАС-2702М. Мы проанализировали 257 дней измерений экспедиционных наблюдений на научном «Боярский» за теплый период (апрель-сентябрь) 2020-2023 гг.

В настоящее время как таковую нуклеацию современными методами зафиксировать сложно, поскольку предел обнаружения аэрозольных частиц большинства конденсационных счетчиков составляет 2-10 нм. На сегодняшний день не существует единого математического критерия или метода для выявления событий всплесков образования наночастиц. Поэтому события образования новых частиц идентифицируются на основе визуального анализа данных, как описано в работе Markku Kulmala [1]. Данная методика получила широкое применение в зарубежных и российских исследованиях.

Согласно методике, мы визуально анализировали полное распределение аэрозоля по размерам за каждые сутки в отдельности. Если в течение нескольких часов (не менее 1 часа) наблюдается преобладание нового типа частиц нуклеационной моды (5-25 нм), появившихся в режиме зарождения, и этот режим демонстрирует явные признаки роста до размеров, характерных для режима Айткена (25-100 нм), то день может быть классифицирован, как день события нуклеационного всплеска. Дни с событием образования наночастиц были разделены на четыре класса:

- Класс 1. Дни, когда скорость роста частиц (GR) и скорость их образования (Jnuc) можно определить с высокой степенью достоверности, режим зарождения четко различим по наблюдаемой эволюции в течение нескольких часов.
- Класс 2. Для события класса 2 характерно образование наночастиц, подобное классу 1, но выражено чуть слабее, при этом признаки образования и дальнейшего роста частиц достаточно хорошо прослеживаются, но продолжаются немного меньше, чем при классе 1.
- Класс 3. Дни, когда определение параметров (GR, Jnuc) было невозможно или точность результатов вызывала сомнения.
- Класс 4. Дни, которые не могут соответствовать критериям класса 1-3, классифицируются как неопределенные, и для них характерно появление некоторых частиц в процессе зарождения, но отсутствие явных признаков продолжительного роста, или наблюдение роста не в режиме зарождения. В этом классе трудно определить, действительно ли произошло событие зарождения или нет.

Для сравнения и анализа изучения причин, приводящих к событиям нуклеационных всплесков, представляют интерес дни, во время которых не наблюдалось образование частиц. Такие дни при анализе классифицируются как случаи отсутствия нуклеации (класс 0).

Анализ данных показал, что наибольшее количество интенсивных процессов зарождения новых частиц (класс 1) наблюдается в апреле и мае, и составляет 41,2% и 15,6%, в то время как наименьшее – в июле (4,8%) и сентябре (4,2%). Выявлено, что события зарождения происходили в течение всего периода наблюдений, и общая частота событий зарождения наночастиц (суммарно классы 1-3) составляет около 58% от всех дней измерений.

1. Kulmala M., Petäjä T., Nieminen T., Sipilä M., Manninen H.E., Lehtipalo K., Dal Maso M., Aalto P.P., Junninen H., Paasonen P. & Riipinen I. 2012. Measurement of the nucleation of atmospheric aerosol particles. *Nat. Protoc.* 7(9): 1651-1667.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Министерства науки и высшего образования РФ", грант 124041500027-2

Метан в западной части евразийской Арктики поздней осенью 2023 года: наблюдения АМК-93 и численное моделирование

Юрий А. Штабкин¹, Константин Б. Моисеенко¹, Игорь Б. Беликов¹, Валерий А. Белоусов¹, Анастасия В. Васильева¹, Марина Д. Кравчишина², Дмитрий А. Пестунов³

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

³ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

yuryshtabkin@gmail.com

Метан (CH_4) является вторым по значимости парниковым газом в атмосфере после углекислого газа (CO_2). Начиная с 2005 года, согласно измерениям, наблюдается заметное увеличение концентрации метана в приповерхностных слоях атмосферы. Особенно ярко это явление проявляется в Арктике. К сожалению, для этого региона данные о приземной концентрации метана крайне ограничены, что затрудняет проведение количественных оценок воздействия эмиссий от наиболее важных региональных антропогенных и биогенных источников. Этот пробел частично восполняется многолетними наблюдениями на арктических и субарктических станциях мониторинга, а также измерительными компаниями в ходе экспедиций на научно-исследовательских судах.

В данной работе представлены результаты непрерывных измерений концентрации метана, углекислого газа и изотопа $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ в приводном слое атмосферы над акваториями Карского и Баренцева морей в ходе 93-й экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК-93), 08 ноября – 07 декабря 2023 года. Кроме того, выполнено сопоставление полученных данных с расчетами региональной химико-динамической модели WRF-Chem и показаны модельные поля приземного содержания метана для отдельных районов российской Арктики. Для района Байдарацкой губы сделаны модельные оценки потоков метана с морской поверхности и приведено их сравнение с проводившимися в ходе экспедиции наблюдениями.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Государственное задание ИФА РАН", грант № 125020501413-6

Мониторинг приземного озона в Государственном природном заповеднике «Карадагский» в 2024 году.

Владимир А. Лапченко¹ , Е В. Лапченко¹

¹ Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского - природный заповедник РАН - филиал ФГБУН ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А.О.Ковалевского РАН", Россия

ozon.karadag@gmail.com

Проанализирован временной ход концентрации приземного озона (КПО) в государственном природном заповеднике «Карадагский» в 2024 году. В сезонном ходе концентрации озона наблюдаются два максимума: основной в июле - августе, и более слабый - в апреле - мае. Подобный сезонный ход концентрации озона характерен для средиземноморских европейских станций. Средний суточный ход ПКО зимой практически не выражен. Летом максимальные среднечасовые концентрации озона регистрировались при направлении воздушных масс, относительно расположения СФЭМ, со стороны моря. В течении 2024 года наблюдался эпизод (19 августа) превышения предельно допустимой максимально - разовой концентрации озона, (160 мкг/ м³).

Работа выполнена в рамках темы Гос. задания (№:124030100098 - 0).

Эмиссии пылевого аэрозоля в условиях естественной конвекции

Елена А. Малиновская¹, Отто Г. Чхетиани¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

elen_am@inbox.ru

В условиях интенсивного прогрева поверхности над аридными территориями помимо ветрового воздействия на вариации концентрации пылевого аэрозоля влияют конвективные движения (до 20-40%). Они проявляются спонтанным формированием термиков [Ju et al., 2018] и явлением термоконвективного выноса микрочастиц пыли из верхнего песчаного пористого слоя [Chkhetiani et al., 2012].

Данные многоуровневых дневных измерений концентрации пылевого аэрозоля (0.2, 0.4, 0.8, 1.6 и 3.2 м) в аридных условиях показывают степенную зависимость от высоты. При слабом ветре степени близки к -0.5, что обусловлено коллективным эффектом от близко расположенных пузырьков прогретого вокруг поднимающихся от поверхности пылинок воздуха [Малиновская Е. А. и др., 2023].

По данным многоуровневых высокочастотных пульсационных измерений до высоты 1 м (0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 м; 1000 Гц) получены температурные профили, выявлены условия и характерное время дня для возникновения температурных инверсий. Определены конвективные структуры различного масштаба. Проведён анализ связей концентрации аэрозоля с температурными изменениями, при относительно интенсивных изменениях которых инверсии распределения в нижнем слое воздуха.

Для исследования подъема ансамбля нагретых пузырьков воздуха от поверхности реализована серия вычислительных экспериментов с использованием открытого пакета OpenFoam. Показано, что высота, скорость и характер подъема теплых объемов воздуха зависит от числа генерируемых поверхностью нагретых пузырьков воздуха.

В условиях неравномерного прогрева поверхности, обусловленного наличием естественного эолового рельефа, возникает горизонтальное усиление ветра, способствующее формированию и отрыву термиков, возникновению циркулирующих движений у поверхности. Эти эффекты исследованы и воспроизведены в серии вычислительных экспериментов.

Отрыв движущихся у поверхности турбулентных структур различного масштаба сопровождается выносом пылевого аэрозоля, проявляющимся всплесковыми изменениями его концентрации на разных высотах. Высокочастотные измерения температуры и скорости ветра (1000 Гц) и концентрации пылевого аэрозоля (10 Гц), позволяют выявить такие структуры и дать оценку их масштабов [Malinovskaya E. A. et al., 2024]. Сами же структуры, наблюдаемые во всех измеряемых пульсационных величинах, могут быть определены как синхронно возникающие треугольные рэмы структуры с вершинами вверх и вниз и демонстрирующие свойства самоподобия..

Для спектров температуры, скорости и концентрации помимо известного наклона -5/3 отмечаются и другие наклоны -1, -3, -1/3, связываемые с конвективными процессами. Особенности изменения статистических характеристик зависят от времени дня и высоты над поверхностью. Для совместных распределений плотности вероятности пульсационных составляющих температуры и скорости проявляются двухпиковье распределения во временном интервале от 13 до 15:00.

Ju, T. et al. Atmospheric Environment, 2018, Vol. 187. P. 62-69.

Chkhetiani, O. G. et al. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, Vol. 12(11), P. 5147-5162.

Malinovskaya, E. A., et al. Doklady Earth Sciences, 2023. 509 (2). 222-229.

Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G., Azizyan G. V. Doklady Earth Sciences, 2024. 516(1). 888-895.

Исследование проведено при поддержке:

Обеспечение сопоставимости данных наблюдений за атмосферной концентрацией парниковых газов на российских станциях мониторинга

Виктор М. Ивахов¹, Нина Н. Парамонова¹, Ян К. Чубченко², Анна В. Колобова², Вячеслав И. Привалов¹, Татьяна С. Анищенко¹

¹ Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Войкова

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева

viktor.ivakhov@voeikovmgo.ru

В докладе представлены результаты наблюдений за атмосферной концентрацией CO_2 и CH_4 на некоторых станциях Росгидромета, расположенных в том числе в арктической зоне РФ. Обсуждаются современные возможности обеспечения сопоставимости данных наблюдений и вопрос создания локальной национальной шкалы молярных долей парниковых газов. Представлены результаты международных межлабораторных сличений по парниковым газам.

При решении задач по оценке баланса парниковых газов (ПГ) в атмосфере на основе данных наблюдений за концентрацией ПГ, выполняемых на различных станциях, принципиально важным является обеспечение сопоставимости таких данных. Так, в рамках программы Всемирной метеорологической организации «Глобальная служба атмосферы» (ГСА ВМО) перед наблюдениям за CO_2 и CH_4 установлены целевые показатели сетевой сопоставимости величиной $0,1 \text{ млн}^{-1}$ и 2 млрд^{-1} , что составляет около $0,025\%$ и $0,1\%$ от среднеглобального уровня содержания CO_2 ($\sim 400 \text{ млн}^{-1}$) и CH_4 ($\sim 2000 \text{ млрд}^{-1}$) в атмосфере соответственно. Достижение таких высоких показателей сопоставимости на сети станций ГСА стало возможным благодаря шкале ВМО, создание которой было обусловлено отсутствием национальных газовых эталонов, способных обеспечить требуемый уровень сопоставимости. В Российской Федерации по программе ГСА ВМО работает только Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Войкова (Росгидромет), тогда как мониторингом ПГ занимается большее количество научных организаций. Такое положение дел во многом обусловлено трудностями, связанными с закупкой и доставкой газовых эталонов из Центральной калибровочной лаборатории ВМО, расположенной в г. Боулдер (США).

В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ЕСНМ КАВ) планируется увеличение количества наблюдений за атмосферной концентрацией основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O) и интеграция системы мониторинга в новую программу ВМО «Глобальная служба наблюдений за парниковыми газами». Поскольку перед ЕСНМ КАВ стоит задача обеспечения сопоставимости данных наблюдений как внутри страны, так и на глобальном уровне, то потребность в стандартах ВМО возрастает.

Проблема распространения шкалы ВМО через национальные институты стандартизации в последнее время приобрела глобальный характер. Решение данного вопроса прорабатывается совместно Международным бюро мер и весов и ВМО. В Российской Федерации запланирована работа по созданию локальной национальной шкалы молярных долей парниковых газов сопоставимой со шкалой ВМО. Такая работа планируется в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в рамках совершенствования государственного первичного эталона единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах ГЭТ 154-2019 в части расширения (парниковые газы) и обеспечения сопоставимости со шкалой ВМО на уровне государственного первичного эталона.

Локальная Национальная шкала будет реализована посредством двух наборов первичных эталонных газовых смесей (далее - ПЭГС) в баллонах под давлением объемом 40 дм^3 . Каждый набор будет состоять из девяти ПЭГС в диапазоне молярных долей диоксида углерода от 380 до 800 млн^{-1} . Два набора изготавливаются для контроля долговременной стабильности ПЭГС.

В докладе обсуждается приготовление, исследование стабильности ПЭГС, а также сравнение с газовыми смесями, приготовленными в рамках CCQM K120.

Сопоставление данных реанализа CAMS с измерениями приземного метана в высокоширотной Арктике

Марина А. Ежикова¹, Сергей П. Смышляев¹

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

m.yozhikova@rshu.ru

В настоящем исследовании рассматривается успешность воспроизведения приземного метана глобальным реанализом парниковых газов CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) EGG4 в Арктическом регионе посредством сравнения с данными непрерывных измерений на научно-исследовательском стационаре «Ледовая База Мыс Баранова» ($79^{\circ}16'$ с.ш., $101^{\circ}45'$ в.д.) в 2015 – 2020 гг. Верификация базы данных CAMS таким образом будет полезна перед последующим её применением в численном моделировании.

Стационар расположен на острове Большевик архипелага Северная Земля в центральном секторе Российской Арктики между морями Карским и Лаптевых. Непрерывные измерения метана проводились с помощью газоанализатора Picarro G2401 методом внутристеклянной лазерной спектроскопии (CRDS, cavity ring-down spectroscopy) в рамках совместного сотрудничества Финского Метеорологического Института (ФМИ) и НИИ Арктики и Антарктики. Данные реанализа предоставлены на сетке с разрешением $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ (~ 80 км) с трехчасовым временным интервалом. Данные реанализа для координат рассматриваемой станции были извлечены методом билинейной интерполяции. Для анализа было рассмотрено 14 872 пары значений данных реанализа и инструментальных наблюдений.

В 60.4% случаев значения реанализа CAMS оказываются меньше, чем результаты измерений на станции, при этом среднее отклонение измерений от данных реанализа и его СКО составляют 16.7 ± 14.5 млрд $^{-1}$ (0.85%). Превышение измеренных значений над результатами реанализа характерно и для других высокоширотных станций, Алерта и Барроу, что отмечено докладах о верификации базы данных CAMS. Максимальное отклонение наблюдаемых значений от данных реанализа составляет 161.1 млрд $^{-1}$ (7.5%), и зафиксировано в феврале 2017 г. Количество случаев, когда модуль разности измеренных и смоделированных значений составляет более 100 млрд $^{-1}$, не превышает 0.2 %. Такие расхождения наблюдаются преимущественно в зимние месяцы, а также в августе и сентябре. Основная часть разностей между наблюдаемыми значениями и результатами реанализа CAMS (43.1%) находится в диапазоне от -10 до 10 млрд $^{-1}$.

Смоделированный и измеренный ряды наблюдений хорошо коррелируют друг с другом: коэффициент корреляции R за весь период наблюдений равен 0.82 ± 0.01 . При этом в отдельные месяцы наблюдается более худшая сопоставимость. Наименьшие значения коэффициента корреляции отмечены в марте 2016 г. ($R = 0.55$), июле 2016 г. ($R = 0.52$), апреле 2019 г. ($R = 0.41$), марте 2020 г. ($R = 0.47$) и июне 2020 г. ($R = 0.46$).

В 2019 и 2020 гг. результаты реанализа значительно ниже измеренных значений по сравнению с другими годами – так, значения среднегодовой разности между данными измерений и реанализом за эти годы составляют 14.0 и 11.7 млрд $^{-1}$ соответственно (против -4.6 в 2016 г., 1.8 в 2017 г. и 1.0 млрд $^{-1}$ в 2018 гг.). Оценка межгодового прироста метана по данным реанализа за рассматриваемый период в целом плохо сопоставима с оценкой по данным наблюдений, и не позволяет сделать однозначных выводов об изменчивости метана от года к году.

Сезонная изменчивость метана хорошо воспроизводится данными реанализа, при этом с декабря по апрель включительно данные CAMS выше наблюдаемых значений, а с мая по ноябрь ниже. Максимальные отклонения наблюдаются с августа по октябрь, что может указывать на недооценку данными реанализа вклада источников регионального или локального масштаба в теплый период года.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Министерство науки и высшего образования РФ", грант проект FSZU-2023-0002

Современные тенденции изменения содержания климатически и экологически важных примесей в атмосфере Приволжского федерального округа.

Георгий И. Шишкин¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет

mr.GoraShi@mail.ru

Проблема качества атмосферного воздуха входит в число главных экологических вызовов современности, находясь в центре внимания специалистов и международных организаций.

В данной работе представлено исследование пространственно-временного распределения примесей в атмосфере на территории Приволжского федерального округа (ПФО) на основе данных реанализа ЕАС4 (CAMS) за период 2003-2022 гг.

Опираясь на информацию, опубликованную в ежегодных обзорах состояния окружающей среды территориальными подразделениями Росгидромета в ПФО, автором были отобраны для исследования следующие загрязняющие вещества, вносящие значительный вклад в загрязнение атмосферы: формальдегид (CH_2O); диоксид серы (SO_2); диоксид азота (NO_2). ВМО относит данные ингредиенты-загрязнители к числу важных климатических переменных, в том числе, способствующих образованию аэрозолей и озона.

В работе проанализирована сезонная вариация средних полей содержания выбранных ингредиентов-загрязнителей воздуха; проведён тренд-анализ; выявлены значимые корреляционные связи полей загрязняющих веществ с ключевыми метеорологическими факторами на основе данных реанализа ERA5.

В ходе исследования были сделаны следующий выводы.

Распределение средних значений полного запаса CH_2O в столбе атмосферы ПФО обладает выраженной сезонной изменчивостью с максимумами в летние месяцы и минимумами в зимние. В распределениях содержания SO_2 и NO_2 выявлена обратная сезонная зависимость. Среднее квадратическое отклонение среднего содержания примесей имеет аналогичную сезонную зависимость.

Для CH_2O и NO_2 преобладают тенденции к накоплению на протяжении большей части года. Для SO_2 в зимний период повсеместно тенденция отрицательная, в летний - положительная лишь местами.

Характер корреляционных связей с температурой приземного слоя воздуха у среднего содержания исследуемых примесей в столбе атмосферы различен. Положительные связи отмечены с CH_2O (на протяжении всего года) и SO_2 (с мая по сентябрь); отрицательные связи - с SO_2 (в январе-феврале) и NO_2 (на протяжении большей части года). В поле u-компоненты скорости ветра - тесные отрицательные связи с SO_2 на протяжении всего года. В поле v-компоненты - тесные положительные связи для SO_2 и NO_2 в период с апреля по октябрь. В поле крупномасштабных осадков - тесные положительные связи с CH_2O в зимние месяцы; с NO_2 - в отдельные зимние и весенние месяцы. Значимые отрицательные связи выявлены с CH_2O в июле, с NO_2 в июле-сентябре, с SO_2 в отдельные месяцы на протяжении всего года (наиболее тесные - в феврале и августе).

Статистический анализ прохождения фронтов над Московским регионом

Светлана А. Рябова^{1,2}

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук , Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук , Россия

riabovasa@mail.ru

Циклонические образования умеренных широт связанные с ними атмосферные фронты являются важнейшими синоптическими объектами, определяющими погодные условия обширных территорий земного шара. Эволюция фронтальных разделов во многом определяет возникновение метеорологических явлений, которые необходимо прогнозировать при обслуживании авиации. В настоящей работе выполняется статистический анализ прохождения фронтов разных типов над Московским регионом.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798-8), интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Постерная сессия

Современные представления об изменениях содержании кислорода в атмосфере Земли

Наталья В. Панкратова¹, Александр С. Гинзбург¹, Мария А. Помелова¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

n_pankratova@list.ru

Кислород жизненно необходим для людей и животных. Тем не менее трендам и изменчивости его содержания в атмосферном воздухе до последнего времени уделялось незаслуженно мало внимания. Это связано с тем, что процентное содержание кислорода в атмосфере Земли меняется незначительно, и с тем, что измерение этих малых изменений представляет собой достаточно трудную техническую задачу. Однако, даже малые изменения содержания кислорода во вдыхаемом воздухе оказываются весьма чувствительными для людей, особенно во время волн жары, которые учащаются и усиливаются в условиях быстрого изменения климата. Доклад посвящен истории развития представлений об изменениях содержании кислорода в атмосфере и обзору исследований последних десятилетий.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Госзадание ИФА им. А.М. Обухова РАН", грант 125021001827-3
2. "Госзадание ИФА им. А.М. Обухова РАН", грант 125020501413-6

Статистические характеристики водозапаса облаков на северо-западе России по данным спутникового прибора SEVIRI

Владимир С. Костцов¹ , Дмитрий В. Ионов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

v.kostsov@spbu.ru

Проанализированы результаты дистанционных измерений водозапаса облаков спутниковым прибором SEVIRI в районе Балтийского моря и северо-запада России в период с 2011 по 2017 год. Для подробного исследования выбраны характерные географические точки на суше и в акваториях крупных водных объектов. Основные выводы работы получены для облачности без осадков с водозапасом, не превышающим пороговое значение 0.4 кг м^{-2} . Дождевые облака классифицировались, как имеющие водозапас более 0.4 кг м^{-2} , и рассматривались отдельно. Проанализированы статистические распределения водозапаса облаков, а также его межгодовая и сезонная изменчивость. Анализ сезонного хода ограничен периодом с февраля по октябрь ввиду отсутствия измерений SEVIRI осенью/зимой при больших зенитных углах Солнца. Особенностями сезонного хода являются минимум водозапаса в феврале и максимум в октябре при практически постоянных значениях с мая по август. В летние месяцы диапазон среднемесячных значений водозапаса над сушей составляет $0.075\text{--}0.080 \text{ кг м}^{-2}$, в то время как над водными объектами диапазон составляет $0.060\text{--}0.065 \text{ кг м}^{-2}$ при значениях погрешности среднемесячных значений менее 0.005 кг м^{-2} . Для водозапаса дождевых облаков сезонный ход в период с февраля по октябрь не наблюдается, значения над сушей и над акваториями практически одинаковы и находятся в диапазоне $0.75\text{--}0.95 \text{ кг м}^{-2}$.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Российский научный фонд", грант 24-27-00016

Оценка валовой первичной продукции для территории Ленинградской области и для территории карбонового полигона «Ладога» по измерениям спутниковой аппаратуры OCO-2.

Степани Ч. Фока¹, Мария В. Макарова¹, Евгений В. Абакумов¹, Дмитрий В. Ионов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

s.foka@spbu.ru

В России, для реализации мер контроля климатически активных газов, а так же оценки потенциала поглощения парниковых газов, было начато создание карбоновых полигонов [1]. Каждый полигон включает в себя репрезентативные экосистемы, характерные для территории нашей страны. На территории земельного участка, принадлежащего Федеральному государственному бюджетному учреждению «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» (~150.6 га, Ленинградская область, п. Воейково)[2] планируется к созданию карбоновый полигон «Ладога», задачей которого будет являться мониторинг потоков климатически активных газов, а также оценка потенциала поглощения парниковых газов экосистемой, характерной для Северо-Запада России (зона южной тайги и зона средней тайги на севере Лен. области).

Валовая первичная продукция (GPP) – величина, характеризующая количество поглощенного растительностью углекислого газа (CO_2) на единицу площади в результате процессов фотосинтеза. В настоящее время используют различные способы оценки GPP[3], наиболее эффективным индикатором фотосинтеза растений является индуцированное солнечным светом флуоресцентное излучение хлорофилла, SIF, со спектральным диапазоном – ~ 650-800 нм. Подтвержденная в работах линейная зависимость между SIF и GPP позволяет с использованием спутниковых измерений SIF оценить количество CO_2 , поглощенного растениями в региональных и глобальных масштабах, без привязки к наземным измерениям[4].

Цель данной работы – количественная оценка GPP и ее временные вариации, характерные для территории Ленинградской области ($59^{\circ}\text{-}61.2^{\circ}$ с.ш., $28^{\circ}\text{-}35.3^{\circ}$ в.д.) по долговременным спутниковым измерениям 2014-2022 гг. с использованием SIF, измеренного спутниковой аппаратурой OCO-2[5].

Анализ данных показал, что для GPP на территории Ленинградской области, включающей в себя как зону южной тайги, так и среднюю таежную зону, характерен годовой ход, максимум которого приходится на июнь, минимум – в период с октября по апрель. Максимальные значения GPP в летний период ($9\text{-}11 \text{ гСм}^{-2} \text{ день}^{-1}$), рассчитанные по данным OCO-2, сопоставимы с GPP для зоны смешанных лесов, представленными в работе [6] $\sim 10\text{-}12 \text{ гСм}^{-2} \text{ день}^{-1}$.

Список литературы

1. Карбоновые полигоны Российской Федерации <https://carbon-polygons.ru/> (дата обращения 12.11.2024)
2. Makarova M.V. et al. From carbon polygon to carbon farm: The potential and ways of developing the sequestration carbon industry in the Leningrad Region and St. Petersburg // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2023. V. 68(1) P. 82-102. Doi:10.21638/spbu07.2023.105.
3. Liao Z. et al. A critical review of methods, principles and progress for estimating the gross primary productivity of terrestrial ecosystems // Front. Environ. Sci. 2023. V. 11 № 1093095. doi:10.3389/fenvs.2023.1093095.
4. Li X., Xiao J. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar- induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production // Remote Sens. of Environ. 2022. V. 268 № 112748. doi:10.1016/j.rse.2021.112748.
5. Doughty R. et al. Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets // Earth. Syst. Sci. Data. 2022. V.14. P. 1513-1529. doi.org/10.5194/essd-14-1513-2022.

6. Lin S. et al. An Open Data Approach for Estimating Vegetation Gross Primary Production at Fine Spatial Resolution // Remote Sensing.2022. V. 14(11) № 2651. doi:10.3390/rs14112651.

Исследование проведено при поддержке:

1. "СПбГУ", грант шифр проекта 123042000071-8, ID Pure: 132271892

Определение потоков метана и углекислого газа с поверхности почвы в атмосферу камерным методом

Егор П. Рябушко¹, Арина Б. Андрюкова, Мария В. Макарова, Евгений В. Абакумов

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

ryabushko@icloud.com

Данная исследовательская работа посвящена изучению потоков углеродсодержащих парниковых газов (CO_2 и CH_4) на территории предполагаемого карбонового полигона в Войеково. Исследование направлено на количественную оценку эмиссии и поглощения этих газов почвой в осенний период с использованием камерного метода, а также на выявление факторов, влияющих на их динамику. Актуальность работы обусловлена важной ролью парниковых газов в глобальном углеродном цикле и их значительном влиянием на климатические изменения.

Метан (CH_4) и углекислый газ (CO_2) являются ключевыми компонентами парникового эффекта. Метан, несмотря на меньшую концентрацию в атмосфере, обладает в 21 раз более высоким потенциалом глобального потепления по сравнению с CO_2 за 100-летний период. Основными природными источниками CH_4 выступают болота и заболоченные территории, вносящие до 30% в общую глобальную эмиссию этого газа. Углекислый газ, концентрация которого в атмосфере достигла 428 ppm к 2025 году, выделяется из почвы преимущественно в результате микробного разложения органического вещества и корневого дыхания растений. Для измерения потоков газов использовался камерный метод, основанный на изоляции участка почвы герметичной камерой и последующей регистрации изменения концентрации газов с помощью высокоточного газоанализатора LI-COR (LI-7810).

Экспериментальные исследования проводились в сентябре и октябре 2024 года на восьми площадках с различными типами почв и растительности: бывшие сельскохозяйственные угодья, склоны с молодыми деревьями и водно-болотные участки. Перед проведением замеров фиксировались ключевые параметры почвы: температура, влажность и уровень рН. Погрешность измерений для CO_2 и CH_4 находилась в пределах 5–10% и 4–7% соответственно.

Анализ результатов выявил несколько важных закономерностей. Во-первых, наблюдался значительный рост потоков парниковых газов в течение осени. Средние значения эмиссии CO_2 увеличились с 389 г/(м²·год) в сентябре до 973 г/(м²·год) в октябре и 1826 г/(м²·год) в ноябре. Для CH_4 также был зафиксирован рост потоков: от 0,25 г/(м²·год) в сентябре до 0,77 г/(м²·год) в октябре и 0,92 г/(м²·год) в ноябре. Этот тренд объясняется снижением фотосинтетической активности растений осенью, что уменьшает поглощение CO_2 , а также продолжающейся микробной активностью в почве благодаря накопленному за лето теплу.

Во-вторых, наибольшие выбросы CO_2 были зарегистрированы на бывших сельскохозяйственных угодьях (например, 2207 г/(м²·год) в октябре на площадке CP4), что связано с наличием лабильных форм углерода, легко вовлекаемых в микробный метаболизм. Водно-болотные участки (CP2, CP9) демонстрировали меньшие потоки CO_2 , но при этом выступали источниками CH_4 с максимальными значениями 0,4 г/(м²·год). На остальных площадках отмечалось поглощение CH_4 , обусловленное активностью метанотрофных бактерий.

В-третьих, выявлена зависимость интенсивности газовых потоков от кислотности почвы. При повышении рН в диапазоне 7,0–8,7 наблюдался рост эмиссии как CO_2 , так и CH_4 , что согласуется с литературными

данными. Кроме того, к поздней осени увеличивался разброс значений потоков — до 17 раз для CO₂ и 34 раз для CH₄. Это может быть связано с резкими суточными колебаниями температуры, которые модулируют активность почвенных микроорганизмов.

Данная работа вносит вклад в понимание роли бореальных экосистем в глобальном цикле углерода и может быть использована для разработки стратегий управления карбоновыми полигонами.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Проект СПбГУ", грант GZ_MDF_2023 - 3, Pure ID 132271892

Влияние метеорологических условий на вариации и долговременные тенденции общего содержанияmonoоксида углерода в Московском мегаполисе.

Наталья С. Кириллова¹ , Вадим С. Ракитин¹ , Анатолий В. Джола¹ , Арсений В. Шилкин^{1,2} , Евгения И. Федорова¹ , Николай Ф. Еланский¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² НПО "Тайфун"

n.kirillova65@gmail.com

В работе представлены результаты комплексного анализа данных долговременных спектроскопических измерений общего содержания СО (ОС СО) на станциях Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) в Москве и Московской области (Звенигородская научная станция, ЗНС). Исследованы метеорологические параметры и долговременные вариации ОС СО в пограничном слое атмосферы (ПСА). Установлено снижение среднегодовых значений ОС СО в 2000–2023 г. для Москвы ($-2.23 \pm 0.36\%/\text{год}$) и Московской области ($-1.12 \pm 0.33\%/\text{год}$). Дополнительно рассмотрены характеристики наблюдаемых трендов СО в разные годы и сезоны.

После 2008 г. темпы спада ОС СО снизились на обеих станциях. Так, в период 2000–2009 гг. ОС СО убывало со скоростью $-2.12\%/\text{год}$ в Москве и $-1.59\%/\text{год}$ на ЗНС, а в 2009–2023 гг. было получено $-1.78\%/\text{год}$ для Москвы и $-0.75\%/\text{год}$ для Звенигорода (оценки на основе среднегодовых значений). В теплый период 2009–2023 гг. для Московской области существенных изменений ОС СО не было обнаружено – величина тренда близка к нулю ($0.04 \pm 0.92\%/\text{год}$).

По данным аэрологического зондирования было зафиксировано увеличение скорости ветра в ПСА Москвы в 2003–2020 гг. на $0.88 \pm 0.39\%/\text{год}$ (по среднегодовым величинам). В то же время в Калужской области статистически значимых изменений скорости ветра не было обнаружено ($0.06 \pm 0.39\%/\text{год}$).

Были исследованы и проанализированы эпизоды накопления СО в атмосфере Московского мегаполиса в штилевые дни. Средняя скорость накопления составила $4.89 \pm 0.32\%/\text{час}$.

Полученные оценки трендов ОС СО и скорости ветра указывают не только на сокращение антропогенных эмиссий Москвы, но и на благоприятное влияние метеорологического фактора на качество воздуха в городе.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Государственное задание", грант № 125020501413-6

Исследование потоков CO_2 для территории кампуса СПбГУ

Владислав О. Крель¹, Стефани Ч. Фока¹, Мария В. Макарова¹, Евгений В. Шевченко¹, Евгений В. Абакумов¹, Виктор М. Ивахов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Войкова

vlad.krel08@mail.ru

Антропогенные и естественные источники выбросов углекислого газа в атмосферу приводят к значительным климатическим изменениям. Для мониторинга парниковых газов и контроля снижения объемов их выбросов необходимы современные, достоверные методы измерения содержания и потоков парниковых газов в населенных пунктах.

В настоящей работе были исследованы потоки CO_2 (F_{CO_2}) методом турбулентных пульсаций [1] для территории кампуса СПбГУ (Петродворцовый район Санкт-Петербурга). Измерения осуществлялись в период с августа 2023 г. по июль 2024 г. с использованием измерительной системы Eddy Covariance System (фирма LI-COR), основные составные части которой - ультразвуковой анемометр uSonic-3 Cage MP и газоанализатор закрытого типа LI-7200RS, регистрирующий концентрации CO_2 и H_2O . Чтобы изучить уровень и источники загрязнений были проанализированы средние потоки CO_2 за полный год и отдельно за каждый месяц. Также проведен их анализ с учетом изменения температуры, направления и силы ветра. Был построен суточный ход потоков CO_2 для каждого месяца.

В ходе исследований получено среднее значение потоков CO_2 за весь рассматриваемый период: $1.95 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Также исследованы суточные вариации потоков CO_2 : минимум средних F_{CO_2} составил $-2.37 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ в июне 2024 г. в 9:30 UTC, а максимум $5.92 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ в декабре 2023 г. в 12:00 UTC.

На основе нашего анализа подтверждена зависимость потоков CO_2 от периода вегетации.

Финансирование и благодарности: Исследование выполнено при поддержке проекта СПбГУ "От карбонового полигона к углеродному регулированию: потенциал и пути развития секвестрационной углеродной индустрии на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга" (GZ_MDF_2023 - 3, Pure ID 132271892). В работе использовано оборудование РЦ "Геомодель" Научного парка СПбГУ.

Ссылки:

1. Метод турбулентных пульсаций, Краткое практическое руководство; Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В., 2016

Исследование проведено при поддержке:

1. "Грант СПбГУ", грант GZ_MDF_2023 - 3, Pure ID 132271892

Исследование влияния лесных пожаров на газовый состав атмосферы

Анастасия А. Кузнецова¹, Мария В. Макарова¹, Евгений Ф. Михайлов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

a.n.anastasia0606@gmail.com

Исследования лесных пожаров и горения биомассы имеют большое значение для понимания глобальных экологических и климатических процессов. Лесные пожары являются одним из ключевых источников выбросов парниковых газов и аэрозолей, которые оказывают значительное влияние на химический состав атмосферы. Целью исследования являлась количественная характеристика влияния лесных пожаров на состав атмосферы на основе долговременных FTIR-измерений содержания газов-трансферов горения биомассы (HCN, CO и C₂H₆) за период 2009-2022 гг. Основные задачи включали разработку алгоритма выявления шлейфов природных пожаров, оценку их вклада в увеличение концентраций исследуемых газов и определение эмиссионных соотношений, характеризующих особенности процессов горения. В ходе работы были проанализированы многолетние временные ряды измерений, проведенных на станции атмосферного мониторинга СПбГУ с использованием спектрального комплекса Bruker IFS 125HR. Разработанный алгоритм выделения эпизодов влияния пожаров основывался на временном критерии (апрель-октябрь) и превышении содержаний газов более чем на два стандартных отклонения. Результаты исследования выявили четыре ключевых эпизода (2012, 2013, 2017 и 2018 гг.), когда шлейфы пожаров приводили к значительному росту содержаний исследуемых газов. Было установлено, что фоновые содержания на два порядка ниже, чем при пожарных выбросах. Это подтверждает, важность учета вклада лесных пожаров в изменение состава атмосферы. На основании проведенного анализа были определены эмиссионные соотношения: HCN/CO = 0,0047 и C₂H₆/CO = 0,0071. Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода для изучения влияния лесных пожаров на атмосферу и могут быть использованы для дальнейших исследований в области атмосферной химии и климатологии.

Исследование проведено при поддержке:

1. "грант Министерства науки и высшего образования РФ", грант соглашение № 075-15-2024-661

Мобильные измерения приземной концентрации метана вблизи полигонов захоронения твердых бытовых отходов

Дмитрий В. Ионов¹, Мария В. Макарова¹, Стефани Ч. Фока¹, Иван М. Исаев²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Россия

d.ionov@spbu.ru

В России захоронение на полигонах является основным способом утилизации твердых бытовых отходов (ТБО), что в отсутствие системы раздельного сбора мусора и его предварительной механической обработки несет угрозу окружающей среде и здоровью населения. Поскольку для полного разложения органического вещества, содержащегося в бытовых отходах, требуется десятилетия, такие полигоны в течение длительного времени остаются источниками эмиссии т.н. свалочного газа, более чем на половину состоящего из метана. Объективный мониторинг эмиссии метана осложняется ее высокой пространственной неоднородностью по поверхности полигонов, что может приводить к существенным ошибкам в оценках суммарного потока метана, получаемых на основе прямых измерений камерным методом.

В апреле 2001 и 2024 гг. авторами осуществлялись специализированные измерительные кампании по исследованию потоков парниковых газов (CO_2 и CH_4) с территории Санкт-Петербурга, основанные на данных прямых измерений приземных концентраций, выполняемых с борта движущегося автомобиля. Измерения проводились по замкнутому маршруту кольцевой автодороги (КАД), огибающему большую часть городских источников антропогенной эмиссии. Эти объезды были нацелены на оценку интегральных выбросов исследуемых газов с территории города методом баланса масс. Предварительный результат анализа данных измерений выявил устойчивый максимум приземной концентрации метана, заметно превышающий ее средний уровень на всем протяжении КАД и локализованный вблизи одного из крупнейших городских полигонов ТБО ("Новосёлки"). Данные измерений обнаруживают локальные максимумы концентрации метана на участках маршрута с подветренной стороны от полигона. Максимальные значения, регистрируемые с борта автомобиля в этом районе наблюдений, достигали ~9 ppmv, что существенно превышает фоновую приземную концентрацию метана, составляющую ~2 ppmv. Средние ночные и утренние пиковые концентрации (~5.0 ppmv) заметно выше дневных и вечерних (~2.3 ppmv). Численное моделирование воздушного распространения свалочного газа, выполненное с помощью дисперсионной модели с учетом характеристик стабильности атмосферы в период наблюдений, продемонстрировало качественное согласие расчетных приземных концентраций метана с экспериментальными данными. На основе сопоставления результатов измерений с данными моделирования шлейфа воздушного загрязнения с территории свалки, получены оценки эмиссии метана, составляющие $\sim 640 \pm 420$ кг/час в апреле 2021 года и $\sim 200 \pm 90$ кг/час в апреле 2024 года. Наблюдаемое существенное снижение эмиссии с 2021 по 2024 год согласуется с официальной информацией о закрытии мусорного полигона в 2018 году и начале работ по укрытию и рекультивации полигона, продолжающихся до настоящего времени. Эмиссия с территории одного мусорного полигона "Новосёлки" может составлять ~10% суммарной антропогенной эмиссии метана с территории Санкт-Петербурга.

Наряду с измерениями на маршруте КАД, в июне 2024 года была выполнена серия кольцевых измерений вокруг другого городского полигона ТБО, "Новый Свет". Получены предварительные оценки эмиссии метана с территории действующего в настоящее время полигона.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ "Геомодель" за счёт гранта Российского научного фонда № 24-27-00033, <https://rscf.ru/project/24-27-00033/>.

Состав приземного воздуха в Москве по данным прямых наблюдений и реанализа CAMS

Елена В. Березина¹, Наталья В. Панкратова¹, Дина П. Губанова¹, Мирсеид Г. Акперов¹, Максим Д. Энкельман²

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

berezina@ifaran.ru

Состав атмосферы в крупных городах непосредственно влияет на качество жизни и здоровье населения. В настоящей работе исследованы сезонные и суточные вариации массовой концентрации малых газовых составляющих атмосферы (NOx, CO) и аэрозолей (PM_{2.5}, PM₁₀) в г. Москве в период с 2005 по 2024 гг. по данным прямых измерений на сети автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (ACK3A) ГПБУ «Мосэкомониторинг» (МЭМ) и модельных расчётов CAMS. Выявлены различия в среднем сезонном ходе концентрации исследуемых примесей по результатам наблюдений и численного моделирования для большинства ACK3A МЭМ. Медианы значений концентрации NOx и CO по данным измерений превышают модельные значения на 0.01 - 0.02 мг, а верхний перцентиль (P90) в 2-3 раза выше рассчитанных. Модельные значения верхнего перцентиля PM_{2.5}, напротив, превышают измеренные в 2 раза. Данные измерений PM₁₀ на большинстве ACK3A МЭМ, в целом, сопоставимы с расчётами модели. Однако реанализ CAMS не воспроизводит летние пики концентрации PM₁₀ и PM_{2.5}, что связано с недоучетом моделью вклада биологического аэрозоля. На фоне многолетнего сезонного хода, медианы значений концентрации исследуемых примесей во время локдауна 2020 г. в период пандемии коронавируса COVID-19 в среднем на 0.01 мг ниже, как по данным ACK3A МЭМ, так и по результатам модельных расчётов. Реанализ CAMS плохо воспроизводит снижение выбросов газов и аэрозолей в период локдауна, но при этом повторяет зарегистрированный ACK3A МЭМ в октябре 2020 г., максимум концентрации PM₁₀, обусловленный дальним переносом пылевого аэрозоля в Москву из районов Северного Прикаспия.

Таким образом, данные реанализа CAMS удовлетворительно воспроизводят средний сезонный ход NO, PM₁₀ и PM_{2.5}, полученный по результатам наземных измерений, при этом значительно занижая верхние перцентили значений массовой концентрации газовых примесей и завышая значения концентрации PM_{2.5}. При численном моделировании также не учитывается вклад биологического аэрозоля в тёплое время года в рост массовой концентрации аэрозольных частиц в приземном городском воздухе.

Исследование проведено при поддержке:

1. "Госзадание ИФА им. А.М. Обухова РАН", грант 125020501413-6

Сравнение результатов многолетних измерений углеродсодержащих аэрозолей на станции ZOTTO с данными реанализа MERRA-2

Сергей С. Власенко¹, Анастасия С. Михайлова¹, Евгений Ф. Михайлов¹, Евгений Ю. Небосько¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

Sergey_Vlasenko@mail.ru

С 2010 года на фоновой наблюдательной станции ZOTTO, расположенной вблизи пос. Зотино в Красноярском крае. Работа, проводятся фильтровые измерения концентрации органического и черного (элементарного) углерода, содержащегося в атмосферном аэрозоле. Полученные многолетние (2020-2024) временные ряды сопоставлены с данными реанализа MERRA-2 о приземной массовой концентрации черного и органического углерода в районе проведения измерений. Показано, что данные измерений хорошо коррелируют с данными реанализа. Коэффициент корреляции для черного углерода составляет 0.79 ± 0.04 , а для органического 0.70 ± 0.04 . Однако наблюдается систематическое превышение, примерно в 4 раза, концентраций ОС и ВС по данным MERRA над концентрациями этих компонент, полученными в результате анализа аэрозольных проб. Одной из наиболее вероятных причин такого расхождения является то обстоятельство, что отбор проб на станции ZOTTO осуществляется с помощью высотной мачты на высоте 300 м над поверхностью, в то время как MERRA дает приземную концентрацию. Особо сильное расхождение между данными измерений и реанализа наблюдается в периоды сильных аэрозольных загрязнений, вызванных лесными пожарами в регионе.

Исследование проведено при поддержке:

1. "БРИКС", грант 075-15-2024-661

Коррекция суточного и недельного хода антропогенных эмиссий в химической транспортной модели с использованием данных инструментальных наблюдений на ВНС ИФА РАН в г. Кисловодск

Мурат И. Нахаев¹, Владимир А. Семенов^{1,2}, Александр В. Чернокульский^{1,2}, Игорь Б. Беликов¹,
Валерий А. Белоусов¹

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Институт географии Российской академии наук

nakhaev@ifaran.ru

Оценка качества атмосферного воздуха является важной задачей в вопросах устойчивого экологического развития и при оценках риска здоровью населения. Точное моделирование концентраций загрязняющих веществ требует наличия надежных начальных данных и учета множества факторов, включая источники антропогенных загрязнений, метеорологические условия и аспекты землепользования.

В работе основное внимание уделено коррекции антропогенных эмиссий как методу повышения точности моделирования. Коррекция эмиссий включает в себя адаптацию химической транспортной модели к реалиям изменчивости выбросов, которая может зависеть от времени суток, сезона и специфики антропогенной деятельности. В качестве индикаторов реального уровня загрязнения в работе использованы данные натурных наблюдений на территории Высокогорной научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ВНС ИФА РАН), г. Кисловодск. Информация об объемах антропогенных эмиссий получена из международного кадастра ЕМЕР и имеет детализацию по пространству с шагом $0,1 \times 0,1^\circ$ (www.emep.int). Поля эмиссий с более высоким разрешением рассчитываются путем распределения эмиссий внутри каждой модельной ячейки с учетом типа землепользования и плотности населения. Учет местных особенностей различного временного масштаба от суток до месяца и сезона осуществляется с использованием архивных данных регионального мониторинга. Для расчета концентраций загрязняющих веществ применяется химическая транспортная модель Chimere версии 2023r3. Расчетный домен составляет 50×50 узлов с шагом 1 км. В качестве критерия точности моделирования используются результаты верификации расчетных концентраций загрязняющих веществ (озыва и угарного газа) по сравнению с реальными данными инструментальных наблюдений. Верификация позволит оценить, насколько хорошо модель отражает реальные условия и выявить возможные расхождения.

Полученные результаты показали значительное снижение ошибок воспроизведения как суточного хода концентраций, так и в целом средних за период показателей, что подчеркивают важность применения коррекции начальных полей эмиссий.

Пылевые события в условиях ветрового и конвективного выноса пылевого аэрозоля

Елена А. Малиновская¹, Никита О. Козлов^{1,2}, Савелий Д. Калинин^{1,2}

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

² Российский государственный гидрометеорологический университет

nikitagarbuzko@gmail.com

Пылевые явления, такие как ветропесчаный перенос, пылевые дьяволы и пыльные бури, играют ключевую роль в земном климате и геологических процессах. Основным фактором, определяющим вынос пылевого аэрозоля (размером 0.1-5 мкм) с аридных территорий, является ветер [1], возникающее в результате перемещение крупных частиц (размеры 70-150 мкм) у поверхности - сальтации. В летнее время в условиях значительного прогрева поверхности существенное влияние оказывают конвективные движения [2]. В результате ударов движущихся в потоке частиц меняется их заряд, что отражается на измеряемых значениях напряженности электрического поля [3]. При высоких скоростях ветра, как во время пыльных бурь или внутри пыльных вихрей, эти электрические поля могут быть значительными [4].

В условиях умеренного ветра и прогрева поверхности по данным комплексных полевых измерений в солнечные дни (с 8 утра до 8 вечера) в условиях интенсивных конвективных движений отмечаются корреляционные связи различных параметров нижней атмосферы, отличающиеся в зависимости от времени дня, прогрева и типа поверхности. Измерения выполнялись ИФА им.А.М.Обухова РАН в 2023 году в летнее время (июль-август) на двух различных территориях: дюнный участок (пос. Нарын-Худук, республика Калмыкия) и степной участок (г. Цимлянск, Ростовская область). Проводился корреляционный для различных пар величин: температуры (T), скорости ветра (U), концентрации пылевого аэрозоля (C), относительной влажности (H), напряженности электрического поля (E). Корреляционные связи в большей степени проявляются в утреннее или вечернее время. Характер закономерностей для аридной и степной зоны отличается, что в частности, связывается с режимом изменения относительной влажности воздуха и типом поверхности.

Надо полагать, что перенос частиц при умеренном ветре с их электризацией имеет близкую природу с экстремальными процессами. Увеличение площади территорий подвижных песков (по данным спутниковых снимков, наблюдений), увеличение числа участвующих в электризации частиц, может влиять на свойства процессов пылепереноса различного типа, в частности, на параметры пылевых событий: слабых и сильных бурь, а также вихрей. Проведен анализ для 9 станций с 2011 г. по 2025 г.: Яшкуль, Комсомольский, Элиста, Утта, Лиман, Ремонтное, Юста, Лагань, Ики-Бурул. Анализировалась частота фиксации умеренных и сильных пылевых бурь, а также длительность. Выявлена тенденция увеличения длительности пылевых событий для нескольких станций. Проведена статистическая оценка частоты появления пылевых вихрей по числу событий в месяц, в год, а также по времени суток, когда наблюдалось событие. Исследована взаимосвязь количества пылевых дьяволов в районе г. Комсомольск от метеопараметров, таких как, температура, скорость ветра, напряженность электрического поля, полученных на близлежащих аридных территориях опытным путем.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда – проект №25-17-00346.