



V Всероссийская конференция с международным участием,
посвященная памяти академика
Александра Михайловича Обухова

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА

Тезисы докладов



The International Conference
dedicated to the memory of academician A.M. Obukhov

TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS

Abstracts

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Москва, 19–21 ноября 2024 г.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. А.М. ОБУХОВА РАН

**Всероссийская конференция,
посвященная памяти академика
Александра Михайловича Обухова**

**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ,
ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ
И КЛИМАТА**

19 – 22 ноября 2024 года
Сборник тезисов

**The Conference
dedicated to the memory of Academician
Alexander Mikhailovich Obukhov**

**TURBULENCE,
ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS**

**19-22 November 2024
Abstracts**

МОСКВА
ФИЗМАТКНИГА
2024

ББК 26.23
Т 864
УДК 551.5

Редколлегия:

О.Г. Чхетиани, И.А. Репина, В.А. Семенов, В.А. Фалалеева, Ю.В. Киселева

**Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА». 19–21 ноября 2024 года. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2024 - 236 с.
ISBN 978-5-89155-432-0**

The Conference dedicated to the memory of Academician Alexander Mikhailovich Obukhov “TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS” 19–21 November 2024. Book of Abstracts. Moscow. Fizmatkniga Publisher, 2024. 236 p.

Научное издание

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ,
ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ
И КЛИМАТА

Всероссийская конференция,
посвященная памяти академика
Александра Михайловича Обухова

19–21 ноября 2024 года

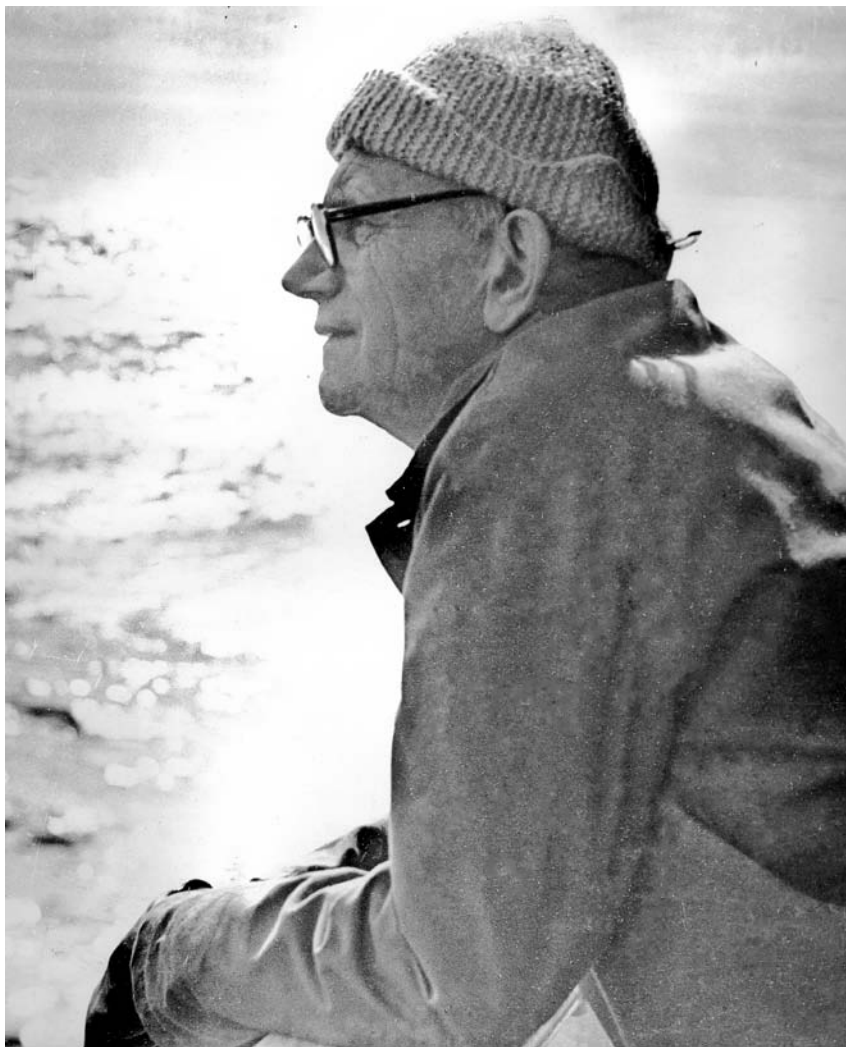
Сборник тезисов

Подписано в печать _____.

Формат 60х90 1/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,0. Уч.-изд.л. 13,0.

Тираж 200 экз.



Александр Михайлович Обухов
5 мая 1918 г. – 3 декабря 1989 г.

Программный комитет

Г.С. Голицын, академик РАН, ИФА РАН – сопредседатель
И.И. Мохов, академик РАН, ИФА РАН/ МГУ имени М.В.Ломоносова – сопредседатель
Р.М. Вильфанд, д.т.н., Гидрометцентр РФ
В.П. Дымников, академик РАН, ИВМ РАН
Н.Ф. Еланский, чл.-корр. РАН, ИФА РАН
А.В. Елисеев, д.ф.-м.н., профессор РАН, МГУ имени М.В.Ломоносова
М.А. Каллистратова, д.ф.-м.н., ИФА РАН
А.В. Кислов, д.г.н., МГУ им. М.В.Ломоносова
С.Н. Куличков, д.ф.-м.н., ИФА РАН
М.В. Курганский, д.ф.-м.н., ИФА РАН
А.А. Макоско, чл.-корр. РАН, Президиум РАН
Е.А. Мареев, академик РАН, ИПФ РАН
М.А. Носов, д.ф.-м.н., профессор РАН, МГУ имени М.В.Ломоносова
В.А. Семенов, академик РАН, ИФА РАН
Ю.Д. Чашечкин, д.ф.-м.н., ИПМех РАН
О.Г. Чхетиани, д.ф.-м.н., ИФА РАН
Н.А. Зайцева, д.г.н., ОНЗ РАН

Организационный комитет

В.А. Семенов, академик РАН, ИФА РАН сопредседатель
О.Г. Чхетиани, д.ф.-м.н., ИФА РАН – сопредседатель
И.А. Репина, д.ф.-м.н., ИФА РАН – зам. председателя
И.Н. Сократова, к.г.н., ОНЗ РАН
С.Н. Куличков, д.ф.-м.н., ИФА РАН
А.В. Чернокульский, к.ф.-м.н., ИФА РАН
А.Ю. Артамонов, ИФА РАН
М.С. Артамонова, ИФА РАН
Н.В. Вазаева, к.ф.-м.н., ИФА РАН
Л.Д. Краснокутская, к.г.н., ИФА РАН
Ю.В. КиселеваЮ ИФА РАН
В.В. Орлова, ИФА РАН
Е.В. Сергеева, ИФА РАН
В.А. Фалалеева, ИФА РАН
Е.И. Федорова, ИФА РАН
А.А. Шестакова, к.г.н., ИФА РАН
А.И. Нарижная, ИФА РАН
Е.А. Марчук, ИФА РАН
Л.И. Толпыгин, ИФА РАН
А.Д. Пашкин, ИФА РАН

Динамика вихревого следа за самолетом в условиях температурной стратификации

Баранов Н.А.

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия

barnik.al@gmail.com

Ключевые слова: вихревой след, температурная стратификация

Вихревые следы за самолетами представляют значительную опасность для позади летящих воздушных судов. На режимах взлета и посадки проблема вихревой турбулентности, генерируемой самолетами, возрастает, поскольку самолеты выполняют полет по одной траектории в непосредственной близости от земли, а интервалы их следования желательно уменьшать для повышения пропускной способности аэропортов. Поэтому исследованиям динамики вихревых следов посвящено значительное количество работ.

В процессе исследований было замечено, что при движении вихревого следа может наблюдаться явление «подскока»: когда вихревой жгут начинает подниматься. Это явление связывали с влиянием отрыва пограничного слоя земли [1]. В данной работе на основе моделирования показано, что явление подскока может быть обусловлено только приземной температурной инверсией. Разработанная математическая модель учитывает действие дополнительного вертикального ускорения, действующего на вихревой след и обусловленного силами плавучести:

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{g}{T_a(h)} (T_a(h_0) - \gamma_a \cdot (h - h_0) - T_a(h)), \text{ где } T_a(h) - \text{температура воздуха на}$$

высоте h , γ_a – адиабатический градиент температуры, h_0 – начальная высота вихря.

Рассмотрены случаи приземной и слабо приподнятой инверсии. Показано, в условиях инверсии происходит подъем вихревого следа. Также показано, что в условиях бокового ветра траектория наветренного вихря может иметь петлеобразный вид. При этом высота подъема вихря пропорциональна градиенту температуры в инверсионном слое. Учет структуры вихревого следа (вихрей от закрылков, горизонтального оперения) не оказывает влияния на динамику вихревого следа в целом даже в условиях ветровой стратификации атмосферы.

Литература:

1. Corjon A., Poinso T. Wake vortices behavior near the ground. //ESAIM: Proc., 1 (1996), P.p. 279-294.
2. Baranov N.A., Turchak L. I. Investigation of aircraft vortex wake structure // AIP Conf. Proc. 1629 (2014). AIP Publishing LLC. P.p. 44 – 55.
3. Proctor F., Hinton D., Han J. and etc. Two Dimensional Wake Vortex Simulations in the Atmosphere: Preliminary Sensitivity Studies. //AIAA (1997) Paper 97-0056.

Методика калибровки оборудования БВС, используемого для измерения параметров атмосферной турбулентности

Беркон Г.А., Поливанов П.А., Маркин В.В.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск,
Россия*

berkon.gleb@mail.ru

Ключевые слова: *атмосферная турбулентность, беспилотное воздушное судно,
мультивентиляторный стенд*

На сегодняшний день беспилотные воздушные суда (БВС) используются для решения широкого спектра задач, в том числе и для исследования атмосферных явлений, например атмосферной турбулентности в приземном пограничном слое[1]. При исследовании атмосферного пограничного слоя основная трудность заключается в определении скорости и направления ветра. Можно выделить два основных подхода в определении ветровых условий с помощью БВС. Первый заключается в использовании специализированных зондов, расположенных на борту БВС. Второй основывается на анализе ветровой обстановки по траектории полета БВС. Например, в случае использования мультиторного БВС в режиме удержания позиции ветровые характеристики могут быть определены исходя из углов наклона (тангаж и крен) БВС.

При полете БВС в условиях атмосферной турбулентности возникают колебания ориентации летательного аппарата (ЛА) в пространстве, что необходимо учитывать при анализе данных вне зависимости от метода исследования ветровой обстановки. Используемые алгоритмы обработки данных необходимо верифицировать. Для этой цели обычно используется сопоставление данных БВС с результатами, полученными стационарными зондами. Недостатки этого подхода заключаются в невозможности гарантированного контролирования окружающих условий непосредственно около БВС.

В данной работе для решения этой проблемы предлагается использование мультивентиляторного стенда[2], который позволяет моделировать в лабораторных условиях ветровую обстановку, близкую к атмосферной турбулентности. Были разработаны подходы, позволяющие моделировать требуемую пространственную и временную неоднородность потока. Были выполнены работы, направленные на получения калибровочных зависимостей для двух квадрокоптеров, которые использовали разные подходы для исследования ветровой обстановки. В результате летных экспериментов было показано хорошее совпадение данных, полученных при помощи разных методик измерения, что позволяет утверждать о корректности полученных калибровочных зависимостей.

Литература:

1. Chechin D.G., Artamonov A.Y., Bodunkov N.E. et al. Experience of studying the turbulent structure of the atmospheric boundary layer using an unmanned aerial vehicle // *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*. - 2021. - Vol.57, No.5. - P. 526-532.
2. Berkon G.A., Polivanov P.A. Generation of atmospheric turbulence in a multifan wind tunnel // XXII International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt. I. Novosibirsk: SB RAS, 2024. P. 11-12.

Предварительные результаты гидрометеорологического прогноза для Северного морского пути с использованием системы атмосфера-океан-лёд

Бутаков Н.Ю., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

nikita.butakov.2019@mail.ru

Ключевые слова: морской лёд, океан, атмосфера, Северный морской путь, Арктика, численное моделирование

Была реализована система гидрометеорологического прогноза параметров состояния атмосферы, океана и морского льда для района пролегания Северного морского пути. В качестве атмосферного компонента в работе использовалась модель WRF, в качестве океанического модель ROMS, параметры состояния морского льда считались при помощи модели CICE. Были получены предварительные результаты расчёта гидрометеорологических параметров и проведена оценка качества расчётов. Оценка качества расчётов показала, что результаты расчёта гидрометеорологических параметров в целом удовлетворительно согласуются с эмпирическими данными, но стоит отметить, довольно большие ошибки в прогнозе приземной температуры воздуха и, как одно из следствий этого, большие ошибки прогноза температуры поверхности моря на западе расчётной области.

Анализ самолетных наблюдений атмосферной турбулентности над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока

Вербицкая Е.М.¹, Вербицкая З.В.¹, Котельникова М.С.², Романский С.О.¹

¹Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Владивосток, Россия

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
derez-z-z-za@yandex.ru

Ключевые слова: турбулентность, прогноз, самолетные наблюдения, анализ данных

Прогноз наличия, местоположения и интенсивности атмосферной турбулентности является весьма актуальной задачей для обеспечения безопасности авиационных полетов. Разработкой методов и технологий расчета прогнозов атмосферной турбулентности различной природы, опасной для авиационных полетов, над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока России и прилегающих территорий (в том числе над акваториями ДВ-морей) занимаются специалисты ФГБУ «ДВНИГМИ» [1] на данных модели WRF-ARW [2]. В процессе исследований по разработке и адаптации методов прогноза и диагноза наличия и интенсивности турбулентности по модельной информации используются данные самолетных наблюдений, поступающие с бортов воздушных судов в коде AIREP.

В докладе представлены результаты анализа данных самолетных наблюдений атмосферной турбулентности над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока за 2020 - 2024 гг. Выявлено, что наибольший объем данных (69%) относится к турбулентности ясного неба, наблюдаемой на высотах более 9000 м, 19% относится к турбулентности в нижней тропосфере. Наименьшее количество сообщений относится к турбулентности облакосодержащего слоя (5,5%). Представлено распределение данных об атмосферной турбулентности по рассматриваемой территории, высотам и сезонам года.

Показано, что данные об атмосферной турбулентности, поступающие в сводках AIREP, в совокупности с метеорологическими данными и физ.-географией местности позволяют определить тип наблюдаемой турбулентности и её интенсивность. Такая информация представляет безусловную ценность при проведении исследований по численному моделированию и прогнозированию атмосферной турбулентности.

Литература:

1. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Опыт применения численных прогнозов погоды для метеорологического обслуживания авиации в дальневосточном регионе России // Метеоспектр. – 2017. – № 2. – С. 117–123.
2. Power J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C. The weather research and forecasting model: overview, system efforts, and future directions. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2017. – Vol. 98, P. 1717–1737

Локальное подобие и распространение полуэмпирической теории Прандтля на описание турбулентных моментов конвективного пограничного слоя атмосферы

Вульфсон А.Н.^{1,2}, Николаев П.В.³

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва
longines1812@yandex.ru

Ключевые слова: конвективный пограничный слой, теория локального подобия, полуэмпирическая теория турбулентности Прандтля

В работе представлен вариант теории локального подобия, использующий в качестве базовых параметров второй момент вертикальной скорости и «спектральный» путь перемешивания Прандтля. Такой подход позволяет выразить коэффициент турбулентного обмена, диссипации кинетической энергии и квадрата плавучести, а также моменты плавучести и вертикальной скорости любого порядка только через два независимых базовых параметра локального подобия. При этом полученные аппроксимации коэффициента турбулентного обмена и диссипации локального подобия полностью согласованы с полуэмпирической теорией Прандтля для атмосферного конвективного граничного слоя.

Показано, что по сравнению с классической теорией подобия, которая позволяет аппроксимировать турбулентные моменты неопределёнными функциями безразмерной высоты, предложенная локальная теория подобия является более эффективным методом исследования, так как позволяет определить аналитический вид аппроксимаций турбулентных моментов с точностью до неопределённых постоянных. Значения данных постоянных определяются по данным измерений в поверхностном слое и соответствуют коэффициентам аппроксимаций свободно конвективных пределов теории подобия Мони́на-Обухова.

Новый вариант теории локального подобия является эффективным для практического применения, так как диапазон высот в котором наблюдается соответствие данных полевых измерений и полученных аппроксимации средних турбулентных параметров достигает 3/4 высоты слоя. Более того, для некоторых турбулентных параметров, таких как диссипаций кинетической энергии и квадрата буссинесковской плавучести соответствие с данными наблюдений наблюдается во всём конвективном слое.

Таким образом новая теория локального подобия значительно расширяет область приложений теории турбулентности Прандтля и теории поверхностного слоя Мони́на-Обухова и существенно дополняет наши представления о турбулентной конвекции в атмосфере.

О точности описания статистики природных явлений уравнениями Колмогорова (1934) для случайных движений

Голицын Г.С.

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

gsg@ifaran.ru

Ключевые слова: распределение вероятностей для космических лучей, литосферных плит и галактик

Смысл и ряд примеров описаны автором в [1]. С тех пор появились новые примеры. Начнем с геометрии облаков. В 1982 г. было показано, что длина периметра облаков к их среднему размеру есть 1.35 ± 0.02 . В 2023 г. соображения размерности дали, что это $4/3$. В 2018 г. данные CloudSat для распределения горизонтальных их длин $n(L) = L^\beta \exp[-(L/L_0)^2]$, $\beta = 1.66$, $L_0 = 1850$ км. В 2023 г. для гистограмм площадей литосферных плит $n(\leq S) = 7S^{-n}$, $n = -0.33$. В 2022 г. в книге автора было опубликовано распределение галактик по массам $n(\leq M) \sim M^{-1/3}$, показавшее, что их массы пропорциональны площадям дисков галактик. В 2023 г. был опубликован спектр энергии космических лучей (дифференциальное распределение) $\sim E^{-n}$, $n = 2.67 \pm 0.02$. Эти лучи играют роль в электризации аэрозоля (климат).

Уравнение Колмогорова дает распределение вероятностей для скоростей и координат. Вторые моменты

$$\langle u^2(t) \rangle = \varepsilon t = E, \langle x^2(t) \rangle = \varepsilon t^3 = S.$$

Распределение будет $n(\leq E) = \varepsilon / E$ и $n(\leq S) = (\varepsilon / S)^{1/3}$. Если масса $M \sim S$, то $n(\leq M) \sim M^{-1/3}$ для галактик (дисков). Анализ распределений площадей для литосферных плит дал $n(\leq S) = 7S^{-n}$, $n = 0.33$.

Для космических лучей, КЛ, по энергии 5 лет измерений дали $n(E) = 7E^{-n}$, $n = 2.67 \pm 0.02$. Теория с учетом выражения на единицу площади дает

$$n(E) = \frac{\varepsilon}{E^2} \left(\frac{w}{E} \right)^{2/3} \sim E^{-8/3}.$$

CloudSat дал $2.67 - 8/3 = 1/300$: для горизонтальной длины облаков $n(L) = L^\beta \exp[-(L/L_0)^2]$, где $\beta = 1.66$, $L_0 = 1850$ км. Дифференциальное

распределение для облаков будет $n(L) = \left(\frac{\varepsilon}{S}\right)^{1/3} \frac{1}{L}$ и поскольку $S \sim L^2$, то теория дает

показатель $-\frac{2}{3} - 1 = -\frac{5}{3}$, т. е. $1.66 - \frac{5}{3} = \frac{498 - 500}{300} = -\frac{1}{150}$. Таким образом теория 1934 года с точностью порядка 1% дает измеряемые показатели.

Литература:

1. Голицын, Г.С. Работа А.Н. Колмогорова 1934 г. - основа для объяснения статистики природных явлений макромира // Успехи физических наук. 2024. 194(1). С. 86-96.

Турбулентные потоки аэрозоля и тепла при всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля

Горчаков Г.И., Чхетиани О.Г., Карпов А.В., Гушин Р.А., Даценко О.И.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gengor@ifaran.ru

Ключевые слова: опустынивание, ветропесчаный поток, эмиссия пылевого аэрозоля, турбулентный поток аэрозоля, турбулентный поток тепла, конвективно обусловленная перемежаемость

Пылевой аэрозоль прямо и косвенно влияет на радиационный режим атмосферы, процессы в биосфере и на здоровье населения. Согласно существующим представлениям, частицы пылевого аэрозоля выбиваются сальтирующими песчаными частицами (сальтация - скачкообразные перемещения песчинок) с подстилающей поверхности (процесс sandblasting). Следует отметить, что существенную роль в процессе выноса частиц пылевого аэрозоля с подстилающей поверхности играют электрические процессы. Значительная часть пылевого аэрозоля поступает в атмосферу с опустыненных территорий и благодаря дальнему переносу пылевой аэрозоль распространяется на большие расстояния. Эффективность дальнего переноса зависит, в частности, от особенностей вертикального переноса и перемешивания пылевого аэрозоля в пограничном слое атмосферы непосредственно после эмиссии с подстилающей поверхности. По данным измерений флуктуаций компонент скорости ветра, температуры воздуха и концентрации частиц аэрозоля на опустыненной территории в Астраханской области в условиях всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля определены вертикальные турбулентные пылевого аэрозоля и тепла [1]. С использованием спектрального анализа охарактеризована временная изменчивость горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра, температуры воздуха и концентрации частиц пылевого аэрозоля. Показано, что всплесковая эмиссия пылевого аэрозоля определяется низкочастотными конвективно обусловленными вариациями горизонтальной компоненты скорости ветра при превышении пороговой скорости сальтации. Плотность потока пылевого аэрозоля при всплесковой эмиссии отличается конвективно обусловленной низкочастотной (квазирелейной) перемежаемостью от плотности потока тепла. Рассчитаны 30-минутные средние значения потоков тепла ($90\text{--}158\text{ Вт/м}^2$) и пылевого аэрозоля ($7.2\text{--}27.5\text{ см}^2\text{см}^{-1}$), а также скорости выноса тепла ($14\text{--}21\text{ см/с}$) и пылевого аэрозоля ($10\text{--}16\text{ см/с}$). Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 20-17-00214).

Литература:

1. Г.И. Горчаков, О.Г. Чхетиани, А.В. Карпов, Р.А. Гушин, О.И. Даценко Турбулентные потоки аэрозоля и тепла на опустыненной территории при всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля // Доклады АН. Науки о Земле. 2024 г. Т.515, №1. С. 124-131.

Электрические процессы в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях

Гущин Р.А., Горчаков Г.И., Карпов А.В., Даценко О.И.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gushchin@ifaran.ru

Ключевые слова: опустынивание, ветропесчаный поток, электрические процессы, обусловленный переносом аэрозоля ток, плотность тока, модуль плотности тока, градиент плотности модуля

Выполнено исследование электрических процессов в ветропесчаном потоке. По данным синхронных измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. плотности электрических токов сальтации и токов, обусловленных переносом заряженных частиц пылевого аэрозоля, на высотах 4 и 12 см рассчитаны статистические характеристики вариаций плотности и модулей плотностей указанных токов [1, 2]. Показано, что в ветропесчаном потоке в диапазоне высот от 4 до 12 см модули плотности электрических токов сальтации и токов, обусловленных переносом пылевого аэрозоля, убывают с высотой значительно медленнее (логарифмические градиенты 0.025 см^{-1} и 0.07 см^{-1}), чем концентрация сальтирующих частиц (логарифмический градиент 0.32 см^{-1}). Подтверждено, что модули плотности электрических токов сальтации коррелируют друг с другом и со скоростью ветра в приземном слое атмосферы теснее, чем сами плотности токов. Получены оценки роли электродинамического механизма сальтации (обусловленной разрядами на подстилающей поверхности) и, соответственно, влияния высокоскоростной сальтации на формирование вертикального распределения сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на высотах от 3 до 15 см. Показано, что вертикальное распределение концентрации сальтирующих частиц с модальным геометрическим диаметром 100 мкм на высотах больше 3 см определяется высокоскоростной сальтацией. В 2024 году были выполнены синхронные измерения градиентов в слое сальтации и над слоем сальтации. Согласно предварительным оценкам, модуль плотности электрического тока, обусловленного переносом заряженных частиц пылевого аэрозоля, в слое сальтации убывает с высотой примерно в 2 раза быстрее, чем над слоем сальтации.

Литература:

1. Г.И. Горчаков, А.В. Карпов, Р.А. Гущин, О.И. Даценко. Электрические процессы в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, №6. С. 461-467
2. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Гущин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В. Пылевая плазма ветропесчаного потока на опустыненных территориях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т.58, № 5. С. 543-553.

Оптические и микрофизические характеристики пылевого аэрозоля на Ближнем Востоке весной 2022 г.

Даценко О.И., Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гушин Р.А.

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

datsenko@ifaran.ru

Ключевые слова: пыльная мгла, оптические и микрофизические характеристики, пылевой аэрозоль, оксиды железа, распределение частиц по размерам, коэффициент преломления, мнимая часть, AERONET

Выполнен анализ вариаций оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в пыльной мгле на Ближнем Востоке с использованием данных AERONET [1]. Оценено влияние содержащих оксиды железа минералов на поглощательную способность пылевого аэрозоля. Показано, что в распределении частиц пылевого аэрозоля по размерам доминирует грубодисперсная фракция. Проанализирована поглощательная способность пылевого аэрозоля. Во время пыльной мглы на всех станциях AERONET наблюдалось поглощение солнечной радиации гематитом (на длине волны 440 нм). Мнимая часть коэффициента преломления достигала 0.006. В отдельных случаях поглощение радиации в пределах точности определения отсутствовало. На станции AERONET IASBS обнаружена по данным мониторинга на длине волны 675 нм сравнительно сильное поглощение солнечной радиации гётитом (мнимая часть коэффициента преломления достигала примерно 0.04). При этом альbedo однократного рассеяния снижалась примерно до 0.7 на длине волны 675 нм. Сильные проявления поглощения солнечной радиации гётитом наблюдались и на спектральных зависимостях аэрозольной оптической толщины поглощения.

Спектральные зависимости аэрозольной оптической толщины коэффициента ослабления (экстинкции) в пыльной мгле на Ближнем Востоке аппроксимировались степенными функциями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-17-00214).

Литература:

1. Горчаков Г. И., Даценко О. И., Копейкин В. М., Карпов А. В., Гушин Р. А., Горчакова И. А., Мирсаитов С. Ф., Пономарева Т. Я. Пыльная мгла на Северо-Китайской равнине // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 12. С. 948–955.

Моделирование столбовых вихревых структур в замкнутой кубической области

Ермаков А.Д.^{1,2}, Фортова С.В.^{1,2}

¹Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия
ermakov.ad@phystech.su

Ключевые слова: численное моделирование, турбулентность, столбовые вихри

Проведено численное моделирование трехмерного вихревых течений в кубической ячейке с твердыми границами при наличии силы Кориолиса и постоянно действующей накачке.

Показано влияние безразмерных параметров системы — чисел Рейнольдса и Россби на формирование качественно отличающихся режимов. В ходе численного эксперимента в зависимости от частоты вращения и величины внешней силы возникают следующие типы течений. Хаотический режим возникает при низкой частоте вращения куба и небольшой величине внешней силы. Режим возникновения нескольких столбовых вихрей небольшого диаметра появляется при увеличении частоты вращения системы и величины внешней силы. При высоких частотах вращения и высокой величине внешней силы формируется тип течения, который можно условно назвать "циклон-антициклон". Он представляет собой большое циклоническое течение, внутри которого формируется устойчивое антициклоническое движение.

Исследованы энергетические характеристики системы и построены энергетические спектры течений. Исследованы радиальные профили средней по времени азимутальной скорости в когерентных вихрях для указанных типов течений. Показано, что они отличаются числом и размерами вихрей и имеют различное распределение завихренности по радиусу вихря. Проведен PDF анализ структуры течений по величине завихренности и частоте ее встречаемости.

Скорость вихревой диссипации как мера интенсивности турбулентности и возможности ее оперативного прогнозирования для метеобеспечения авиации

Иванова А.Р., Шакина Н.П., Комасько Н.И., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А., Соколова У.О.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
ivanova@mecom.ru

Ключевые слова: скорость вихревой диссипации, метеорологическое обеспечение авиации, модель COSMO-Ru, прогноз интенсивности турбулентности

С 2001 г. Международная организация гражданской авиации определила в качестве стандарта турбулентности параметр EDR (eddy dissipation rate), представляющий собой кубический корень из величины скорости диссипации турбулентной кинетической энергии. Пороговые значения максимальных значений EDR разделяют градации интенсивности турбулентности. Прогнозирование параметра EDR в численных моделях прогноза погоды осуществляется чаще всего с применением ансамблевого прогноза, иногда с использованием методов машинного обучения. С 26 ноября 2024 г. предполагается передавать глобальные прогнозы турбулентности в единицах EDR на сетке 0.25x0.250 для каждого из 36 эшелонов (от FL100 до FL450) с заблаговременностью до 48 ч. Прогнозирование турбулентности должно производиться для двух ее видов: индицируемой конвекцией и той, что возникает без участия конвективных процессов.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» выполнена работа по проверке качества полей EDR, генерируемых моделью COSMO-Ru-ENA6.6. Сравнение рассчитанных значений EDR с передаваемыми с борта воздушных судов над территорией части Северной Атлантики и Европы обнаружило недостатки модельного блока «Турбулентность». Предложено альтернативное решение для прогноза интенсивности турбулентности на базе применения комбинации известных критериев турбулентности, откалиброванных по фактическим значениям EDR. В качестве критериев рассматривались индекс Эллрода, индекс деформации вертикального сдвига фронтогенетическая функция и индекс Брауна. Представлены некоторые результаты сверхкраткосрочного прогноза интенсивности турбулентности на эшелонах полета.

Вариации турбулентных потоков пылевого аэрозоля на опустыненной территории

Карпов А.В., Горчаков Г.И., Гушин Р.А.

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

karпов@ifaran.ru

Ключевые слова: пылевой аэрозоль, ветропесчаный поток, генерация аэрозоля, турбулентный поток аэрозоля

На опустыненных территориях под воздействием ветропесчаного потока генерируется значительное количество поступающего в атмосферу пылевого минерального аэрозоля. Для количественной оценки эмиссии аэрозольных частиц проводятся измерения турбулентных потоков аэрозоля с подстилающей поверхности в приземный слой атмосферы. С целью повышения точности определения вертикальных турбулентных потоков аэрозоля по данным измерений турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра и счетной концентрации частиц аэрозоля на опустыненной территории, нами были рассчитаны скорости выноса аэрозоля корреляционным методом на двух уровнях высоты, а также градиентным методом. Обнаружено влияние шлейфа от точечного источника аэрозоля на результаты расчетов турбулентных потоков двумя методами, оценены границы применимости корреляционного и градиентного методов определения турбулентных потоков аэрозоля в условиях помех. Проанализированы особенности временного хода концентрации аэрозоля на разных высотах при попадании измерительной аппаратуры в область шлейфа от точечного источника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-17-00214).

Особенности взаимосвязи сезонной и суточной динамики массовой концентрации чёрного углерода (сажи) в приземном субмикронном аэрозоле г. Москвы в 2023 г.

Козлов В.С., Карпов А.В., Горчаков Г.И., Гушин Р.А., Даценко О.И.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
vkozlov@ifaran.ru

Ключевые слова: чёрный углерод, концентрация сажи, межсезонная изменчивость, суточный ход, приземный субмикронный аэрозоль

Исследованы устойчивые особенности связи динамики межсезонных и суточных вариаций концентрации чёрного углерода ВС в субмикронном аэрозоле по данным круглосуточных измерений в приземном слое воздуха в центре г. Москвы в 2023г. с помощью аэлометра AE33-7, размещенного в ИФА РАН им. А.М. Обухова. Статистический анализ показал, что среднесезонные концентрации сажи составили 2.64 ± 2.25 мкг/м³ весной, 2.10 ± 1.69 мкг/м³ летом, 2.04 ± 1.86 мкг/м³ осенью и 1.86 ± 1.14 мкг/м³ зимой. Установлены закономерности связи межсезонной динамики и суточного хода концентрации ВС. Оценки различий для временных интервалов «Ночь» (0-9, 23-24 ч), «Утро» (9-12 ч); «День» (12-20 ч) и «Вечер» (20-23 ч) показали, что периоды характеризуются различными особенностями изменения концентрации сажи. Ночью динамика среднесезонных концентраций согласуется с изменчивостью годовых сезонных концентраций, варьируя в пределах: 1) весенний максимум $3.4\text{--}3.6$ мкг/м³; 2) летний максимум 3.06 мкг/м³; 3) осенние максимум 2.15 мкг/м³ и минимум 1.75 мкг/м³; 4) зимний минимум 1.30 мкг/м³. Качественно иная сезонная динамика проявляется днем: широкие зимний максимум 2.25 мкг/м³, весенний и осенний минимумы 1.80 мкг/м³ и летний минимум 1.35 мкг/м³. В сезонной динамике сажевого аэрозоля определяющий вклад вносят ночной и дневной периоды, формирующие основные экстремумы концентрации сажи. Весной концентрация ВС меняется в течение периода Ночь – День в 2 раза (от 3.4 до 1.6 мкг/м³), а осенью на 30%. Весной и летом отчетливо выражены дневной минимум и ночной максимум концентрации сажи. Комплексный анализ сезонной и суточной изменчивости концентрации сажевого аэрозоля в приземном слое атмосферы в 2023г. позволяет предложить рассматривать установленные особенности ночной и дневной динамики как проявление разных типов микрофизической погоды для поглощающего сажевого аэрозоля в приземном слое воздуха.

Работа выполнена в рамках Госзадания (FMWR-2022-0010), Регистрационный номер: № 1021042900488-7-1.5.10.

О быстрых поворотах (прокрутах) ветра в приземном слое

Копров В.М., Копров Б.М., Чхетиани О.Г., Шишов Е.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
vkoprov@gmail.com

Ключевые слова: турбулентность, приземный слой, направление ветра, вихревые структуры

Рассматривается явление так называемых "прокрутов" - случаев, когда направление скорости ветра за короткое время изменяется больше, чем на 360 градусов. Для обработки использовались данные, полученные с трехкомпонентных акустических анемометров с частотой регистрации 20 Гц или 32 Гц. Измерения производились в летних экспедициях Института физики атмосферы РАН им. А.М. Обухова на Цимлянской научной базе института в 2012, 2014, 2015 и 2016 годах на высотах до 20 метров. Эти данные использовались также в работах [1-3]. Была написана специальная программа для автоматического поиска прокрутов в рядах экспериментальных данных. Зафиксировано множество коротких (длительностью от долей секунды до нескольких секунд) интервалов, на которых направление ветра изменяется на целый оборот или даже на несколько оборотов. Угол ветра в конце прокрутного интервала возвращается приблизительно к уровню его начала. В отдельных сериях количество «прокрутов» может достигать 5-10 явлений в час. Обнаружено также явление группового прокрута, т.е. перемещения прокрута между анемометрами группы при использовании их пространственного размещения по схеме «тетраэдр» в измерениях спиральности с базой 5 м [1] и 0.7 м [2]. Изучение имеющегося материала показывает, что прокруты возникают при снижении скорости ветра до величин порядка 0,3 м/с. Это может объясняться механизмом сложения относительных скоростей при прохождении воздушных вихрей. Регистрируя прокруты одновременно несколькими анемометрами, разнесенными в пространстве, можно оценить скорость перемещения вихрей и сравнить ее со средней скоростью ветра.

Представляется перспективным изучение данного явления и набор статистики по частоте появления прокрутов при различных условиях устойчивости приземного слоя (параметров теории подобия Обухова–Монина). Предложенный метод обработки данных позволяет изучать завихренные структуры даже по одноточечным измерениям.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 20-17-00214.

Литература:

1. Копров В.М., Копров В.М., Курганский М.В., Чхетиани О.Г. Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности // Изв. РАН. ФАО. 2015. Т. 51. № 6. С. 637-647.
2. Копров В.М., Копров В.М., Чхетиани О.Г., Солёная О.А., Шишов Е.А. Методика и результаты измерений турбулентной спиральности в стратифицированном приземном слое // Изв. РАН. ФАО. 2018. Т. 54. № 5. С. 525–537.
3. Шишов Е.А., Солёная О.А., Копров В.М., Копров В.М. Исследование вариаций направления ветра вблизи поверхности земли // Изв. РАН. ФАО. 2018. Т. 54. № 6. С. 611–620.

Конвективные структуры вблизи нагретой поверхности

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В.

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

elen_am@inbox.ru

Ключевые слова: конвективные структуры, пульсации температуры, экспедиционные исследования, рэпмы, спектральная функция

В естественных условиях дневного прогрева поверхности аридных и субаридных территорий возникают горизонтальные и вертикальные градиенты температуры. Неоднородность температурного поля влияет на конвективные движения, подъем воздуха [1] с выносом субмикронного аэрозоля. Плотность распределения конвективных элементов связывается с пульсациями температуры [2], что влияет на изменение концентрации пылевого аэрозоля с высотой. В данных измерений температуры и скорости, обнаруживаются треугольные пилообразные всплески, называемые «фрампами» [5], определяющие структуру конвективного теплового потока [7].

В комплексных полевых исследованиях ИФА им. А.М. Обухова РАН, проводимых на территории Черноземельского района республики Калмыкия, определялись пульсации температуры и скорости на высоте до 1 м от поверхности. Частота фиксации 1000 Гц позволила выявить на основе анализа спектральных функций характерные масштабы структур от 0.2 до 2 м и от 0.02 до 0.1 м для верхней и нижней окрестностей перегибов около инерционного интервала «-5/3». На частотах выше инерционного интервала определяются степени близкие к «-1», которые характерны для жаркого времени дня после прогрева поверхности. Степень «-1» связывается с наличием тепловых неоднородностей и значительного температурного градиента. Степень «-4/3» обусловлено условием сохранения тепловых неоднородностей, порождающих турбулентные пульсации.

Визуальный анализ относительных изменений пульсационных составляющих температуры выявляет наличие треугольных несимметричных структур («фрампов»). Их размер зависит от интервала осреднения, меняется от 300 мс до 10 с, при сопоставлении выявляются случаи самоподобия структур.

Авторы благодарят Л.О.Максименкова, Е.А.Шишова, Б.А.Харцхаева (Калмыкия) за помощь в организации и проведении натурных измерений. Выражаем признательность Г.С.Голицыну и Е.Б.Гледзеру за внимание к работе и конструктивные замечания.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 20-17-00214)

Литература:

1. Snyder R. L. et al. Surface renewal analysis for sensible and latent heat flux density //Boundary-Layer Meteorology, 1996. T. 77. C. 249-266.
2. Taylor R. J. Thermal structures in the lowest layers of the atmosphere. Australian Journal of Physics, 1958. Vol. 11(2). P. 168-176.
3. Darisse, A., Lemay, J. & Benaïssa, A. Budgets of turbulent kinetic energy, Reynolds stresses, variance of temperature fluctuations and turbulent heat fluxes in a round jet. J. Fluid Mech. 774, 2015. P. 95–142.

Пространственные распределения аэрозоля в тропосфере по данным проекта DELICAT

Мамонтов А.Е., Федорова О.В., Горбунов М.Е.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
alex1372049@gmail.com

Ключевые слова: лидар, дистанционное зондирование, пространственные спектры, флуктуации аэрозоля, рассеяние, турбулентность

В 2009–2015 г. выполнялся проект DELICAT (DEmonstration of Lidar based Clear Air Turbulence detection, Демонстрация обнаружения турбулентности ясного неба (ТЯН) при помощи лидара), с участием ИФА РАН [1–2]. Для обнаружения ТЯН впереди по курсу самолета на расстояниях до 15 км в режиме реального времени использовался бортовой лидар.

Флуктуации интенсивности излучения, рассеянного аэрозолем, являются основной помехой.

Мы анализируем пространственные спектры флуктуаций плотности аэрозоля. Для анализа выбирались отрезки полета с постоянными высотой, направлением и скоростью самолета. 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) неподвижные облака на масштабе времени порядка 1 минуты, 2) малые вариации направления линии зондирования. 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 представляет собой плоскую волну в направлении диагонали, и, следовательно, разложение такого сигнала по гармоническим волнам будет содержать только гармонические волны вдоль диагонали. Это позволяет отфильтровать шум. Диагональные сечения полученных спектров равны одномерным пространственным спектрам флуктуаций аэрозоля. Одномерные спектры подчиняются степенному закону с показателем от 2 до 2.5.

Работа выполнена при поддержке госзадания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (FMWR-2022-0016).

Литература:

1. European Community's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) under grant agreement № 233801.
2. J.Kopeck, P.Vrancken. DELICAT Demonstration of Lidar-Based CAT Clear Air Turbulence detection. http://elib.dlr.de/87930/1/DELICAT-RoyMetSoc_20140115_DLR-ICM_p.pdf

Определение областей атмосферной турбулентности с заданными характеристиками

Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.

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

nev@iao.ru

Ключевые слова: колмогоровская турбулентность, неколмогоровская турбулентность, когерентная турбулентность

Для оперативного определения типа атмосферной турбулентности (колмогоровской, когерентной и др.) разработана новая методика на основе алгоритма спектрального анализа последовательных перекрывающихся выборок из постоянно пополняемой совокупности данных метеоизмерений. Выборки формируются методом скользящего временного окна.

Критерием смены типов турбулентности выступает величина наклона инерционного интервала спектра флуктуаций температуры вблизи максимума, равная « $-5/3$ » в колмогоровской турбулентности, « $-8/3$ » в когерентной турбулентности. Наклон вычисляется из уравнения линейной регрессии на начальном участке спектра, протяжённость которого устанавливается по уровню уменьшения на один порядок от максимума. Показано, что такие наклоны спектров для зарегистрированных метеоситуаций в городских условиях распределены логнормально.

Обнаружено, что доля неколмогоровской турбулентности в более чем 5 миллионах рассчитанных спектров значительно больше ожидаемой и составляет 75–97% в зависимости от строгости оценки. Показано, что последовательности спектров с одинаковым наклоном соответствуют областям турбулентности одного типа. Размеры областей оцениваются на основании информации о скорости ветра и продолжительности регистрации. Для параллельной обработки больших массивов метеоданных используется MPI-версия алгоритма для вычислительного кластера с произвольным числом узлов.

Областью применения методики является оценка и регистрация размеров пространственных областей колмогоровской и когерентной турбулентности, областей «сильной» и «слабой» турбулентности, в которых интенсивность турбулентности находится в фиксированных интервалах, а также областей с фиксированной температурной стратификацией.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023-2025»).

Доказательство гипотезы Хопфа о структуре турбулентности

Носов В.В.¹, Лукин В.П.¹, Ковадло П.Г.², Носов Е.В.¹, Торгаев А.В.¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

nev@iao.ru

Ключевые слова: гипотеза Хопфа, хаос, турбулентность, когерентные структуры

Физической расшифровкой гипотезы Э. Хопфа [1] о конечномерности аттракторов в фазовом пространстве решений уравнений Навье–Стокса является сформулированное А.С. Мониным и А.М. Ягломом [2] представление о турбулентности как о пространственно-временном хаосе конечного числа взаимодействующих когерентных структур.

В ряде работ авторов установлен вид турбулентного спектра флуктуаций внутри одной когерентной структуры, и показано, что атмосферную турбулентность можно рассматривать как некогерентную смесь различных когерентных структур с несоизмеримыми частотами главных вихрей. Также показано, что сумма всех спектров разных когерентных структур с различными внешними масштабами турбулентности соответствует спектру колмогоровской турбулентности.

Из сравнения представления авторов и представления Хопфа–Монина–Яглома видно, что научные взгляды на структуру турбулентности, сформированные в разные исторические периоды, совпадают. Таким образом, результаты авторов являются экспериментальным и теоретическим доказательством гипотезы Хопфа, на основе которого можно сделать вывод, что хаос турбулентности в значительной степени детерминирован. Это, в свою очередь, можно расценить, как крупный шаг в решении основной (фундаментальной) проблемы турбулентности, которая в формулировках Фридмана–Келлера и Монина–Яглома звучит следующим образом: по начальным значениям гидродинамических полей и соответствующим граничным условиям установить значения гидродинамических характеристик потока для любого последующего момента времени.

Доказанная гипотеза Хопфа позволяет упростить анализ структуры турбулентности над подстилающей поверхностью. В условиях преобладания одной когерентной структуры флуктуации оптического излучения обычно ослабляются, поэтому можно выработать рекомендации по наиболее благоприятному режиму проведения астрономических наблюдений.

Литература:

1. Hopf E. A mathematical example displaying features of turbulence // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1948. V. 1. №. 4. P. 303-322.
2. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 696 с.

Методы анализа вихревых течений колмогоровского типа в квадратной области

Посудневская А.О.^{1,2}, Фортова С.В.¹, Долуденко А.Н.³, Гузев М.А.⁴, Колоколов И.В.², Лебедев В.В.²

¹Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, Россия

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Москва, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

⁴Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия

posudnevskaja.ao@phystech.edu

Ключевые слова: турбулентность, когерентный вихрь, анализ, численное моделирование, вязкая жидкость

Данная работа посвящена изучению двумерного течения вязкой слабосжимаемой жидкости в квадратной ячейке, возбуждаемого внешней силой с характерным масштабом накачки меньше размера ячейки. В процессе прямого численного моделирования системы уравнений Навье-Стокса численным методом Мак-Кормака в зависимости от величины коэффициента трения о дно и амплитуды силы накачки получены различные типы течений: ламинарный, турбулентный и вихревой [1].

Предложены различные способы анализа возникающих при численном моделировании типов течений: исследование положения максимального значения завихренности от времени, исследование функционального поведения коэффициентов Фурье для поля скорости для разных масштабов, ранговый анализ полей завихренности по величине и по частоте встречаемости значений завихренности [2].

Литература:

1. Doludenko, A.N., Fortova, S.V., Kolokolov, I.V., Lebedev, V.V. Coherent vortex versus chaotic state in two-dimension turbulence. *Annals of Physics*, v. 447, part 2, 2022, paper 169072
2. Guzev M.A., Fortova S.V., Doludenko A.N., Posudnevskaya A.O., Ermakov A.D. Maslov Rank Distribution for the Analysis of Two-Dimensional and Quasi-Two-Dimensional Turbulent Flows. *Russian Journal of Mathematical Physics*, v. 31, 2024, pp. 438-449.

Относительная спиральность в условиях измерительных полигонов Калмыкии и Цимлянска

Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Шишов Е.А., Азизян Г.В.

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

Solenaya.Oksana@gmail.com

Ключевые слова: турбулентность, завихренность, плотность спиральности, пограничный слой, методы измерений

Сегодня спиральность довольно распространенное понятие в атмосферной динамике. Спиральность является мерой запутывания и связывания вихревых линий а ее интеграл – инвариантом для баротропных течений идеальной жидкости при наличии консервативных внешних сил [1].

Величина, называемая относительной спиральностью - косинус угла между векторами скорости и ротора скорости [2,3] связана с малой мгновенной скоростью диссипации турбулентной энергии, области большой турбулентной активности коррелируют с областями относительно малой плотности спиральности. Она хорошо исследована для различных потоков, таких как однородная и изотропная турбулентность, вихрь Тейлора-Грина, потоки в каналах, вращательный поток, а также пограничные слои и слои перемешивания [4]. В [4] численные расчеты предсказывают значительную величину локальной спиральности вблизи ядра когерентных структур.

На данный момент спиральность исследуется численно или измеряется методами термоанемометрии в лабораторных условиях [2,3,4]. В нашей работе спиральность измерена в полевых условиях в пустынных условиях Калмыкии и степных условиях Цимлянского полигона с помощью 3-компонентного акустического циркулиметра, разработанного в ИФА РАН.

В данной работе рассмотрено несколько десятков часовых интервалов. Среднее значение относительной спиральности порядка нескольких сотых. В изучаемой мелкомасштабной турбулентности присутствуют неустойчивые структуры, в которых не следовало бы ожидать значений плотности спиральности, свидетельствующих о выравнивании векторов скорости и завихренности. Исследованы корреляции между плотностью спиральности и скоростью, завихренностью, энтропией и энергией. Корреляции плотности спиральности и энергии в некоторых случаях сравнимы с корреляциями плотности спиральности и энтропии, а в некоторых случаях действительно меньше, что может свидетельствовать о наличии устойчивых вихревых структур [4].

Литература:

1. Moffatt H.K. . J Fluid Mech 35(1):117–129 (1969)
2. R. B. Pelz, Phys. Rev. Lett. 54, 2505 (1985).
3. J. M. Wallace, J. L. Balint, and L. Ong, Phys. Fluids A 4, 2013 (1992).
4. Y. Choi, Y. Park, and C. Lee, Phys. Rev. E 80, 017301 –(2009)

Численное моделирование турбулентности в атмосферном пограничном слое с использованием моментной алгебраической модели

Старченко А.В., Дель И.В., Сваровский А.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия
starch@math.tsu.ru

Ключевые слова: турбулентность, атмосферный пограничный слой, мезомасштабная модель TSUNMZ

Численное моделирование турбулентной структуры в АПС является важной фундаментальной и прикладной задачей динамической метеорологии и численного прогнозирования погодных условий. Решению этой проблемы с различным уровнем детализации посвящено большое количество известных научных публикаций [1,2]. Исторически при моделировании турбулентности в атмосферном пограничном слое использовались два подхода в зависимости от соотношения размера горизонтальной сетки и турбулентного масштаба энергосодержащих вихрей. В мезомасштабных моделях численного прогноза погоды, где размер сетки значительно превосходит масштаб турбулентности, применялись одномерные модели турбулентности атмосферного пограничного слоя, базирующиеся на осреднении по Рейнольдсу, для параметризации турбулентности подсеточного масштаба. В процессе развития численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов появилась потребность моделирования в случае, когда размеры горизонтальной сетки используемой численной модели, повышение разрешения которой позволяет более точно представлять, например, влияние существенно неоднородного рельефа поверхности, сопоставимы с турбулентным масштабом энергосодержащих вихрей.

В предлагаемом докладе представлены результаты разработки и применения оригинального метода расчета турбулентных параметров АПС в мезомасштабных моделях численного прогноза погоды с высоким разрешением (~1 км), который опирается на осреднение по Рейнольдсу и модель турбулентности, включающую трехмерные нестационарные уравнения переноса для турбулентной кинетической энергии, масштаба турбулентных пульсаций и дисперсии турбулентных пульсаций потенциальной температуры. Для оценки достоверности полученных результатов численного моделирования привлекаются данные наблюдений метеостанций ИОА СО РАН, выполненные в 2022 году.

Литература:

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ньистадт Ф.Т.М., Ван Доп Х. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 352 с.
2. Andren A. Evaluation of a turbulence closure scheme for air-pollution applications // J. Appl. Meteorol. 1990. V. 29. N 3. P. 224-239.
3. Численное моделирование погоды и качества атмосферного воздуха в городах / А.В. Старченко, Л.И. Кижнер, Е.А. Данилкин, Е.А. Шельмина [и др.]. Томск: Изд-во ТГУ, 2022. 140 с.

Вертикальное перемешивание и обмен в условиях сильной мезомасштабной динамики и экстремального атмосферного воздействия

Степанов Д.В.¹, Сачнева Н.В.¹, Островский А.Г.², Шестакова А.А.³

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

step-nov@poi.dvo.ru

Ключевые слова: вертикальное перемешивание, мезомасштабные вихри, тропические циклоны, метод перестановок Торна, тонкоструктурная параметризация, численное моделирование, Японское море

Вертикальное перемешивание относится к числу основных процессов, формирующих состояние вод как отдельных акваторий, так и всего Мирового океана.

На основе тонкоструктурных измерений скорости течений и термохалинной стратификации получены количественные оценки интенсивности вертикального обмена массой, теплом и солью над континентальным склоном в северо-западной части Японского моря с апреля по октябрь 2015 [1]. Анализ интенсивности вертикального перемешивания, оцененного с помощью тонко-структурной параметризации, выявил периоды, характеризующиеся высокими значениями коэффициента эффективного обмена. Сделано предположение о ведущей роли мезомасштабных вихрей, а также экстремального атмосферного воздействия связанного с двумя тропическими циклонами, в интенсификации вертикального перемешивания и обмена.

Оценки вихревой кинетической энергии, полученные по данным тонкоструктурных измерений, продемонстрировали наличие максимумов. Максимумы энергии соответствовали периодам прохождения мезомасштабных вихрей через станцию, что подтвердил совместный анализ спутниковых данных температуры поверхности моря и профилей температуры, солёности и плотности. Установлено, что прохождение антициклонического вихря через станцию сопровождалось ростом коэффициента эффективного обмена массой на несколько порядков с 10^{-5} до 10^{-3} м²/с.

Рассмотрены два случая прохождения тайфунов через заякоренную станцию. Подтверждена резкая интенсификация ветровой нагрузки в период прохождения тайфунов вблизи станции, а также рост амплитуды колебаний на близкой к инерционной частоте для скорости и плотности. Численные расчеты с моделью ROMS-WRF [2] подтвердили генерацию интенсивных колебаний на квази-инерционной частоте. Получены оценки вертикального потока плавучести на основе результатов численного моделирования и данных инструментальных измерений.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00333, <https://rscf.ru/project/23-27-00333/>.

Литература:

1. Turbulent mixing and its contribution to the oxygen flux in the northwestern boundary current region of the Japan/East Sea, April–October 2015 / A. Ostrovskii, D. Stepanov, D. Kaplunenko [et al.] // J. Marine Sys.– 2021. – Vol. 224. – Art. no. - 103619.
2. Impact of the Novaya Zemlya Bora on the Ocean-Atmosphere Heat Exchange and Ocean Circulation: A Case-Study with the Coupled Model / A. Shestakova, A. Debolskiy // Atmosphere. – 2022. - Vol. 13. Art. no. - 1108.

Структура потоков тепла и влаги в зональных равнинных ландшафтах России в условиях глобального потепления

Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н.

Институт географии РАН, Москва, Россия

titkova@igras.ru

Ключевые слова: *явное тепло, скрытое тепло, равнинные ландшафты*

Цель исследования - оценка изменений передачи зональными ландшафтами равнин России явного и скрытого тепла атмосфере как одного из направлений исследования теплового баланса земной поверхности на мезомасштабном уровне.

Рассматривается территория субарктических, бореальных, суббореальных ландшафтов на Европейской части России и Западной Сибири. Использованы данные реанализа ERA5-Land (<https://cds.climate.copernicus/>) за летние месяцы 1950–2023 гг.: поток явного тепла (Дж/м^2), поток скрытого тепла SS (Дж/м^2).

Выявлено, что в летний период в субарктических и суббореальных ландшафтах теплообмен с атмосферой происходит в основном за счет потоков явного тепла. В бореальных ландшафтах - за счет скрытого тепла. Бореальные ландшафты ЕТР и ЗС передают в атмосферу примерно сравнимое количество явного тепла во все месяцы с максимумом в июне, июле меньше в августе. В суббореальных ландшафтах потоки скрытого постепенно уменьшаются от июня к августу. Самые высокие значения потоков скрытого тепла отмечаются в южной тайге и подтаежной зоне ЕТР и ЗС в июне и июле.

Получено, что за 1950–2023, в суббореальных ландшафтах отмечается значимое увеличение восходящих потоков тепла. В субарктических ландшафтах роль потока скрытого тепла в тепловом равновесии увеличивается, а в суббореальных ландшафтах растет вклад потока явного тепла. В последний климатический период 1991-2020 гг. тренды потока явного и скрытого тепла в суббореальных ландшафтах усиливаются.

Одним из природных рубежей повышенных горизонтальных градиентов теплообмена летом является вся зона средней тайги. Второй рубеж неоднородности потоков тепла проходит в суббореальных ландшафтах. Неоднородность турбулентного теплообмена увеличилась севернее самих областей с максимальными горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-27-00047 «Структура потоков тепла и влаги в зональных равнинных ландшафтах России в условиях глобального потепления»

Численное моделирование вихревого меридионального переноса тепла в Мировом океане

Ушаков К.В.¹, Ибраев Р.А.^{2,1}

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

ushakovkv@mail.ru

Ключевые слова: Мировой океан, численное моделирование, вихреразрешающая модель, вихревой меридиональный перенос тепла

Сложность измерений делает мезомасштабные вихри одним из наименее обеспеченных наблюдениями объектов в океане. Между тем они вносят существенный вклад в перенос тепла и пресной воды. Данные спутниковой альтиметрии показывают, что вихри широко распространены в океане, но их роль в процессах переноса важна в определенных местах. Зачастую вихревой перенос направлен перпендикулярно или противоположно переносу среднего потока в горизонтальном и/или вертикальном направлении и может иметь сопоставимую с ним величину. Прямые реконструкции океанского вихревого переноса по результатам контактных и дистанционных измерений ограничены разрешением порядка сотен километров, поэтому численное моделирование остается единственным инструментом, способным воспроизвести глобальную трёхмерную структуру мезомасштабных океанских вихрей и их влияние на термохалинный баланс.

Мы представляем оценки вихревого меридионального переноса тепла (ВМПТ), полученные с помощью вихреразрешающей модели общей циркуляции океана INMIO [1], работающей в массивно-параллельной программной среде CMF [2] в условиях атмосферного и радиационного форсинга CORE-II за 1978-1982 годы.

ВМПТ оценивается как разница между полным переносом и переносом, вычисленным на основе 3-месячных скользящих средних значений температуры и скорости. Он составляет существенную часть общего переноса вблизи экватора, в Южном океане, в районах взаимодействия течений с батиметрией и друг другом. В тропиках получены качественные отличия от результатов некоторых других моделей и наблюдений. В частности, это касается значений конвергенции восточно-тихоокеанского ВМПТ, где особого внимания заслуживает динамика волн тропической неустойчивости. Получено, что в этих условиях вихревой перенос тепла может иметь положительную составляющую вдоль направления горизонтального градиента температуры (т.е. от холодных вод к тёплым), что делает необоснованной его традиционную параметризацию по формуле теплопроводности с положительным коэффициентом диффузии.

Литература:

1. Ушаков К.В., Ибраев Р.А. О роли вихрей в глобальном меридиональном переносе тепла океана // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 486. - №2. - С. 243-246. doi: 10.31857/S0869-56524862243-246
2. Kalmykov V.V., Ibrayev R.A., Kaurkin M.N., Ushakov K.V. Compact Modeling Framework v3.0 for high-resolution global ocean-ice-atmosphere models // Geoscientific Model Development. - 2018. - V. 11. - № 10. - P. 3983 – 3997. doi: 10.5194/gmd-11-3983-2018

Методы анализа двумерных и квазидвумерных турбулентных течений колмогоровского типа

Фортова С.В.⁴, Гузев М.А.¹, Посудневская А.О.³, Долуденко А.Н.², Ермаков А.Д.⁴

¹Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Москва, Россия

⁴Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, Россия

sfortova@mail.ru

Ключевые слова: численное моделирование, вихревые каскады, турбулентность

Анализ и классификация режимов течений жидкости, возникающих при их численном моделировании- актуальная задача современной гидродинамики.

В данной работе на примере течения типа Колмогорова для двумерного движения вязкой жидкости и квази-двумерного течения вращающейся несжимаемой жидкости предложены различные методы анализа возникающих при численном моделировании видов течения.

Показано, что для хаотического, вихревого и ламинарного типов движения жидкости методика построения ранговых распределений для величины завихренности и частоты ее встречаемости может быть эффективно использована для классификации типов течений.

Литература:

1. Doludenko A.N., Fortova S.V., Kolokolov I.V., Lebedev V.V. Coherent vortex versus chaotic state in two-dimension turbulence // Annals of Physics 2022 Vol. 447 part 2 169072
2. М.А. Guzev, S. V. Fortova, A.N. Doludenko, A.O. Posudnevskaya, A.D. Ermakov, Maslov Rank Distributions for the Analysis of Two-Dimensional and Quasi-Two-Dimensional Turbulent Flows // Russian Journal of Mathematical Physics 2024, Vol. 31, No. 3, pp. 438

Exact unsteady solution to the n-dimensional compressible Navier-Stokes equations

Чефранов С.Г., Чефранов А.С.

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

schefranov@mail.ru

Ключевые слова: турбулентность, сжимаемость, вязкость

Exact explicit analytical vortex and potential solutions to the n-dimensional inviscid Burgers equations in the Euler variables for an inertial movement of fluid particles in unbounded space is obtained [1] (see also [2], [3]). An exact analytical solution to the one-dimensional compressible Euler equations in the explicit form for the well-known Riemann implicit solution is obtained [4]. The corresponding example of an exact solution for the main turbulence theory problem is stated on its basis [4]-[6]. An example for exact analytical solution with finite integral of energy for 3-D unsteady compressible Navier-Stokes equations in the unbounded space that is regular over arbitrary large time only when any finite viscous is taken into account is obtained [2],[3]. Onsager's dissipative anomaly problem, which is also known as Kolmogorov's hypothesis about an independence of the turbulence energy dissipation rate on the Reynolds number in the inertial sub-range of scales, is possible to precisely resolve only in the six-dimensional space.

Литература:

1. S. G. Chefranov, Sov. Phys. Dokl. 36(4), 286 (1991)
2. S. G. Chefranov, A. S. Chefranov, Phys. Scr., 94, 054001 (2019);
3. S. G. Chefranov, A. S. Chefranov, Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 83, 205118 (2020)
4. S. G. Chefranov, A. S. Chefranov, Phys. Fluids, 33, 076108 (2021);
5. S. G. Chefranov, A. S. Chefranov, Phys. Fluids 34, 036105 (2022)
6. A. S. Chefranov, S. G. Chefranov, G. S. Golitsyn, Astrophysical J., 951:38 (2023)

Спектральные характеристики мезомасштабной турбулентности в устойчиво-стратифицированной атмосфере, полученные по данным самолетных измерений и инфразвукового зондирования атмосферы

Чунчужов И.П.¹, Попов О.Е.¹, Чхетиани О.Г.¹, Куличков С.Н.¹, Белан Б.Д.², Фофонов А.В.²,
Ивлев Г.А.², Козлов А.В.²

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

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

igor.chunchuzov@gmail.com

Ключевые слова: мезомасштабные флуктуации, внутренние волны, устойчивая стратификация, самолетные измерения, инфразвуковое зондирование

В работе представлены результаты самолетных измерений мезомасштабных флуктуаций скорости ветра, температуры и концентраций газовых составляющих в устойчиво-стратифицированной тропосфере Арктической зоны России [1] и Гренландии (по данным измерений метеопараметров гражданскими самолетами: <http://www.iagos.org>) с горизонтальными масштабами от 400 м до сотни километров. Спектры флуктуаций интерпретируются с помощью модели формирования спектра мезомасштабных флуктуаций скорости ветра и температуры в устойчиво-стратифицированной атмосфере, учитывающей существенное влияние адвекции частиц среды, создаваемой суммарным полем внутренних волн и горизонтальных вихревых движений. Объяснено наличие перехода от так называемого спектра Настрома-Гейджа [2] с наклоном $-5/3$ в горизонтальном диапазоне масштабов 6–200 км к более крутой части спектра на коротких масштабах 0.4–6 км с наклоном, близким к -3 . Эти результаты подтверждают хорошо известные данные ранних самолетных исследований [3]–[7], указывающих на существование в устойчиво-стратифицированных слоях тропосферы подобласти плавучести с крутым спектром турбулентных флуктуаций с наклоном близким к -3 . Были проанализированы также профили и спектры флуктуаций скорости ветра, полученные вдоль 82-х наклонных трасс самолетов в периоды их подъемов и спусков. В среднем их наклон в диапазоне вертикальных масштабов 40–600 м составлял $-2,7$. Полученные наклонные спектры в тропосфере сравнивались с вертикальными спектрами флуктуаций скорости ветра в стратосфере, восстановленными по данным инфразвукового зондирования стратосферы. Все спектры, полученные как по самолетным измерениям, так и по данным инфразвукового зондирования, спадают с ростом вертикального волнового числа по закону, близкому к -3 и очень слабо зависят от высоты.

Литература:

1. Chunchuzov I., Chkhetiani O., Kulichkov S., Popov O., Belan B., Fofonov A., Ivlev G., Kozlov A. J. *Atm. Sci.* 2023. V. 81. 105–124.
2. Nastrom G., Gage K. J. *Atmos. Sci.* 1985. V. 42. 950–960.
3. Myrup L. *Tellus*. 1969. V.21(3). 341–353.
4. Lumley J. J. *Atm. Sci.* 1964. V.21. 99–102.
5. Lilly D., Lester P. J. *Atmos. Sci.* 1974. V. 31. 800–812.
6. Vinnichenko N. et al.. *Turbulence in the Free Atmosphere*, 1980. New York, 310 pp.
7. Bacmeister J. et al. *J. Geophys. Res.* 1996. D101. 9441–9470.

Нестационарный турбулентный обмен в верхнем пограничном слое моря и когерентные структуры

Чухарев А.М., Павленко О.И., Коржув В.А.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

alexchukh@mail.ru

Ключевые слова: морская турбулентность, прибрежная зона, когерентные структуры, натурные измерения, структурная функция, скорость диссипации, нестационарная модель

Процессы взаимодействия атмосферы и океана существенно зависят от интенсивности турбулентности в сопряженных слоях двух сред. Современные модели турбулентности для приповерхностного слоя моря удовлетворительно работают при умеренных ветрах и расходятся с наблюдениями при слабом ветре и при шторме. Наиболее вероятной причиной расхождения является недостаточный учет различных источников турбулентности в этом слое.

Для более полного описания механизмов генерации турбулентности нами предлагается рассмотреть когерентные структуры, в которых возникают локальные неустойчивости, приводящие к дополнительной турбулизации течения.

По натурным измерениям гидрофизических характеристик в приповерхностном слое в районе океанографической платформы МГИ рассчитывались структурные функции поля скорости течений. С помощью спектрального и вейвлет-анализа структурного параметра определены временные и пространственные характеристики вихревых образований. Для параметризации рассчитанной спектральной функции использовалась гармоническая функция, которая была интегрирована в разработанную ранее нестационарную модель турбулентного обмена для верхнего пограничного слоя моря. Расчеты по усовершенствованной модели демонстрируют принципиальное улучшение соответствия с измерениями при слабом ветре, в то время как другие известные модели в таких условиях могут занижать значения скорости диссипации турбулентной энергии на два порядка и более. Подобранная модельная константа оказалась достаточно универсальной и расчеты при умеренных и сильных ветрах также хорошо соответствовали экспериментальным данным.

Таким образом, учет влияния когерентных структур и локальных неустойчивостей в среднем течении улучшает модельное представление о турбулентном перемешивании в верхнем квазиоднородном слое моря.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 22-17-00150.

Численное моделирование парения квадрокоптера в турбулентной атмосфере

Шелехов А.П.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
ash1404@mail.ru

Ключевые слова: моделирование, квадрокоптер, эталонный измеритель, атмосферная турбулентность, взаимная корреляция, коспектр, фаза, ошибка измерений

Предложена численная модель парения квадрокоптера в атмосфере для изучения процесса мониторинга атмосферной турбулентности с помощью БПЛА. Компьютерное моделирование поля скорости ветра основано на подходе, суть которого заключается в пропускании через линейный, не меняющийся во времени, фильтр белого шума, задаваемого спектром турбулентности Драйдена. Динамика квадрокоптера исследована с использованием как модели идеального парения квадрокоптера, так и численной модели плоского квадрокоптера. В работе представлен сравнительный анализ результатов численного моделирования измерений турбулентных флуктуаций скорости ветра, полученных с помощью квадрокоптера и эталонного измерителя. Исследованы функция взаимной корреляции, коспектр и фаза, полученные в результате моделирования измерений с использованием квадрокоптера и эталонного измерителя. Изучено расхождение между данными БПЛА и эталонного измерителя. Показано, что до процедуры сглаживания рядов измерений в 95% случаев расхождение не превосходит величину ~ 2 м/с. После сглаживания рядов измерений расхождение существенным образом уменьшается, и оно не превосходит величину 0.5 м/с в 95% случаев.

Особенности параметризаций турбулентных характеристик: данные оптических и микрометеорологических измерений

Шиховцев А.Ю., Ковалло П.Г.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

ashikhovtsev@iszf.irk.ru

Ключевые слова: турбулентность, оптическая турбулентность, флуктуации показателя преломления воздуха

Проблеме параметризации характеристик мелкомасштабной атмосферной турбулентности уделяется существенное внимание в мире. В данной работе рассматриваются подходы к оценке турбулентных характеристик атмосферы на основе совместного анализа данных измерений флуктуаций фазы световой волны, распространяющейся в турбулентной атмосфере (наклонная трасса) и мачтовых микрометеорологических измерений в приземном слое атмосферы. Анализируется характер вертикальных изменений вертикальных профилей оптической турбулентности и возможности его оценки по вертикальным градиентам скорости ветра. Исследован сценарий уменьшения интенсивности оптической турбулентности на фоне роста вертикальных градиентов скорости ветра в нижнем 500 м слое атмосферы над Байкальской Астрофизической Обсерваторией. «Развитие подходов для параметризации турбулентности выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10043, <https://rscf.ru/project/24-72-10043/>».

Разработка системы для многоточечных измерений в приземном слое атмосферы

Шишов Е.А., Зайцева Д.В., Люлюкин В.С.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
shishov.yegor@gmail.com

Ключевые слова: приземный слой атмосферы, многоточечные измерения, метеорологические датчики, автономные системы регистрации

В 2012-22 годах на Цимлянском полигоне ИФА РАН проводились многоточечные измерения направления ветра и температуры воздуха в приземном слое. Основные результаты работ отражены в публикациях [1], [2]. Все датчики были связаны с системой регистрации по проводам, что ограничивало масштаб измерительной площадки несколькими сотнями метров. Для изучения мезо- и субмезомасштабных процессов была создана новая система регистрации. Было изготовлено 10 автономных метеостанций на двухметровых треногах. Каждая метеостанция регистрирует направление ветра (флюгер на датчике угла MAB22A), скорость ветра (датчик Wind Sensor Rev. P компании Modern Device), температуру и влажность (датчик DHT22). Контроллером в метеостанции служит плата Arduino Nano. Данные со всех датчиков в текстовом формате записываются на карту памяти microSD один раз в секунду. Для меток времени используется модуль RTC DS3231. Время на всех метеостанциях может быть синхронизировано благодаря установленным модулям GPS ATGM336H. Текущие дата и время, показания всех датчиков и напряжение на аккумуляторе в реальном времени выводятся на небольшой OLED дисплей, что облегчает контроль работы каждой станции. Для электропитания метеостанций используются свинцовые аккумуляторы 12V 12Ah. Одного такого аккумулятора хватает на 2-3 суток непрерывной работы станции. Также возможно подключение солнечных панелей или аккумуляторов большей емкости.

Испытания собранной системы проводились в полевых экспедициях в Республике Калмыкия в 2023-24 годах близ поселка Нарын-Худук. Метеостанции были установлены вдоль линии «Север-Юг» с интервалом 500 м. Представлены предварительные результаты статистического анализа данных.

Автономность и относительная дешевизна метеостанций позволяет использовать их для изучения воздушных потоков в горах, прибрежных зонах и на равнинах; сопутствующих измерений при изучении атмосферной турбулентности; проверки результатов компьютерного моделирования.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант 20-17-00214.

Литература:

1. Шишов Е.А., Солная О.А., Копров Б.М., Копров В.М. Исследование вариаций направления ветра вблизи поверхности земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 6. С. 611–620.
2. Шишов Е.А., Солная О.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В., Копров В.М. Многоточечные измерения температуры и ветра в приземном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 286–297.

Интегралы сохранения и случайные источники в теории турбулентности

Юшков В.П.

*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия*

vpvushkov@vandex.ru

Ключевые слова: турбулентность, диссипация, гамильтонов формализм, адиабатические и вихревые процессы

В работе рассматривается роль лагранжевых инвариантов в диссипативной и анизотропной системе, какой является турбулентный поток. Дается новое толкование гамильтонову формализму и рассматривается его связь с классической теорией турбулентности. Предлагается физическое обоснование спектральных свойств случайных источников в уравнении движения. На основе экспериментальных наблюдений устанавливается связь интегральных (внешних) масштабов турбулентных спектров с характеристиками адиабатического шума. Предложено уравнение, связывающее выравнивание флуктуаций энтропии со скоростью генерации адиабатических флуктуаций. Построены оценки амплитуды адиабатического шума в турбулентной среде и показана связь его энергии с временем корреляции вихревых флуктуаций.

Колмогоровские спектры как ряды случайных процессов

Юшков В.П.

*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия*

vpvushkov@yandex.ru

Ключевые слова: турбулентность, вероятность, энтропия, адиабатический шум

Появление вероятности в уравнениях гидродинамики связывается с неоднородностью лагранжевых частиц и неустойчивостью их движения. Мера вероятности задаётся через флуктуации плотности и связанные с ними флуктуации энтропии/потенциальной температуры/скорости звука. Колмогоровские спектры предлагается рассматривать как сумму (спектров) случайных процессов с ограниченной шириной спектра, что соответствует представлению интегралов Лебега-Стилтьеса. На основе решения задачи на собственные функции и собственные значения для корреляционной функции флуктуаций скорости звука/энтропии в турбулентном потоке вводится гильбертово пространство волновых функций турбулентных флуктуаций. Нарушение приближения Буссинеска рассматривается как малый параметр обратный критическому числу Рейнольдса. На основе данных измерений предложена гипотеза о равновесной форме спектра адиабатического шума.

Адиабатические флуктуации давления в турбулентном потоке

Юшков В.П., Курбатов Г.А.

*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия*

vpvushkov@yandex.ru

Ключевые слова: турбулентность, давление, адиабатические и вихревые флуктуации, спектры

Показано, что адиабатические флуктуации давления в турбулентной среде имеют тот же порядок дисперсии, что и вихревые флуктуации в классической теории несжимаемой вихревой турбулентности. Эти два типа флуктуаций, однако, имеют разные дисперсионные соотношения и, имея один пространственный масштаб, разный частотный спектр. Предлагается объяснение формы спектров флуктуаций давления в турбулентном потоке, которые известны ещё с 60-х годов прошлого века и не являются степенными. По множеству натурных измерений в пограничном слое атмосферы и хорошо известным результатам измерений в аэродинамических трубах делается вывод о форме равновесного спектра адиабатических флуктуаций в турбулентной среде. Проведены расчёты, подтверждающие связь энергии и ширины спектра адиабатических флуктуаций с интенсивностью турбулентного перемешивания в АПС.

Режимы поведения квазигеострофического эллипсоидального вихря в горизонтальном потоке с вертикальным сдвигом

Арутюнян Д.А.¹, Жмур В.В.^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия
zhmur-vladimir@mail.ru

Ключевые слова: эллипсоидальные вихри, бароклинные течения, режимы вращения, нутационные колебания, неограниченное вытягивание

Цель предлагаемой работы – продемонстрировать режимы поведения эллипсоидальных вихрей в бароклинных горизонтальных течениях с вертикальным сдвигом и сравнить эти режимы с поведением аналогичных вихрей в равновзвешенных баротропных потоках.

В результате численного исследования поведения вихрей в горизонтальных потоках с вертикальным сдвигом были выявлены следующие типы эволюции вихрей:

- Режим вращения, при котором проекция вихря на горизонтальную плоскость квазипериодически проворачивается на 360° с одновременной ограниченной деформацией длин всех полуосей эллипсоида.

- Режим нутационных колебания аналогичен режиму вращения, но при этом проекция вихря испытывает ограниченные колебания в горизонтальной плоскости вокруг направления течения с одновременной ограниченной деформацией полуосей.

- Режим неограниченного вытягивания вихря по направлению течения, который наступает с самого начала расчета.

Совмещенный режим вращения и неограниченного вытягивания, при котором вначале вихрь квазипериодически вращается, но начиная с некоторого времени вращение прекращается и наступает режим неограниченного вытягивания.

В режиме вращения и нутационных колебаний вихрь испытывает ограниченные вариации длин полуосей. В режимах неограниченного вытягивания и совмещенному режиму вращения и неограниченного вытягивания вихрь в конечном итоге уничтожается течением посредством его вытягивания. В первом варианте уничтожение начинается сразу, во втором варианте вначале вихрь живет и эволюционирует в фоновом течении вращаясь как обычно, но затем он останавливается и начинается неограниченное вытягивание его ядра. Последний режим был назван нами как режим ограниченного времени жизни вихря в течении.

Первые три режима (режимы вращения, нутационных колебаний и неограниченного вытягивания) имеют аналоги с поведением вихря в баротропных потоках. Режим ограниченного времени жизни присутствует только в бароклинном фоновом потоке и полностью отсутствует при эволюции вихря в баротропном течении.

Учащенное усвоение данных и сверхкраткосрочный численный прогноз погоды в системе COSMO-Ru2By

Блинов Д.В.¹, Ривин Г.С.^{1,2}, Кирсанов А.А.¹, Бундель А.Ю.¹, Смирнов А.В.¹

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

²Кафедра метеорологии и климатологии, Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

battercake@ya.ru

Ключевые слова: усвоение данных, ДМРЛ, сверхкраткосрочный численный прогноз погоды, система COSMO-Ru, «теплый» старт, конвективные явления

В докладе рассказывается о результатах сравнения успешности численных прогнозов погоды для оперативной системы COSMO-Ru2By при использовании двух видов начальных данных. В первом случае начальные данные подготавливались интерполяцией из данных глобального моделирования (прогнозы модели ICON с шагом 13.2 км) – «холодный старт». Во втором случае начальные данные подготавливаются на целевой сетке модели COSMO-Ru2By с шагом 2.2 км за счет предварительного расчета и усвоения данных наблюдений – «теплый старт».

Для проведения «теплого старта» в Гидрометцентре России создана система усвоения данных (СУД) для конфигурации COSMO-Ru2By. СУД использует встроенные в модель COSMO методы усвоения данных – Nudging и его подвид Latent Heat Nudging (LHN).

Наличие собственных полей анализа из СУД позволило подготавливать начальные данные чаще и раньше на 1 час 15 минут, чем поступают данные глобального моделирования. По аналогии с HRRR (High Resolution Rapid Refresh) в NCEP и RUC (Rapid Update Cycle) в DWD система COSMO-Ru2By настроена на учащенный выпуск прогнозов (каждый 3 часа в 2024 году).

В результате проведенной верификации для июля 2022 года получено, что случае холодного старта для осадков минимальный период раскручивания (spin-up) в COSMO-Ru2By от данных ICON равен 2 часа. В случае «теплого старта» лучшие показатели успешности воспроизведения осадков достигаются в первые 2 часа прогноза, то есть раскручивание отсутствует.

Анализ отдельных случаев показал, что система COSMO-Ru2By с теплым стартом значительно успешнее воспроизводит явления погоды, сопутствующие сильным конвективным осадкам – локальные возмущения температуры, влажности, давления, порывы ветра, грозы, град, суперячейки и смерчеопасные ситуации.

Исследование проведено в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета AAAA-A20-120021890120-8 и AAAA-A20-120021490079-3.

Литература:

1. Блинов Д.В., Ревокатова А.П., Ривин Г.С. Усвоение данных наблюдений в системе краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru Гидрометцентра России. // Метеорология и гидрология. 2024. №7. С. 68-80. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2024-7-68-80>
2. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Астахова Е. Д. и др. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4(374). С. 37-53.

Климатология мезомасштабных когерентных структур Северной Атлантики

Гавриков А.В.¹, Кошкина В.С.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия
gavrikov@ocean.ru

Ключевые слова: когерентные структуры, мезомасштабные процессы, атмосфера

Под атмосферными мезомасштабными процессами чаще всего понимаются вихревые структуры размерами от 20 до 1000 км. В нашей работе мы воспользовались существующими в турбулентной гидродинамике методами выделения когерентных (вихревых) структур для автоматической идентификации и отслеживания атмосферных маломасштабных (от 50 км) вихрей над Северной Атлантикой. Данный метод идентификации был применен к высокоразрешающему атмосферному историческому анализу NAAD (North Atlantic Atmospheric Downscaling) HiRes. Результатом работы является климатология мезомасштабных процессов в регионе, также представлены методы автоматической классификации вихрей по типам динамики.

Переход к турбулентности при периодической модуляции скорости вращения

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.

Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

olga@imec.msu.ru

Ключевые слова: турбулентные течения, перемежаемость, сферическое течение Куэтта

Численно исследованы переходы к турбулентности в течениях вязкой несжимаемой жидкости во вращающемся сферическом слое при встречном вращении границ. Угловая скорость внешней сферы периодически изменяется, угловая скорость внутренней сферы остается постоянной. Рассматривались трехмерные течения, а также линейная устойчивость двумерных течений по отношению к трехмерным возмущениям в виде бегущих азимутальных волн. Обнаружена смена во времени ламинарных и турбулентных состояний, занимающих всю область течения. Зависимость продолжительности ламинарной фазы от амплитуды модуляции показала соответствие расчетных и экспериментальных данных. Анализ фазовых скоростей распространения линейных мод позволил объяснить наличие критического значения амплитуды модуляции, приводящего к переходу к турбулентности, и появление перемежаемости в рассматриваемых течениях. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00051.

К теории склоновых течений

Ингель Л.Х.^{1,2}

¹Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

lev.ingel@gmail.com

Ключевые слова: склоновые течения, атмосфера, кatabатические ветры, турбулентность, теплообмен, спиральность, физические механизмы, теория, аналитические модели

Представлены некоторые новые результаты, относящиеся к теории склоновых течений, в частности, некоторые обобщения классической модели Прандтля.

1. Проанализирована спиральность склоновых течений, существующая при наличии заметного вклада кориолисовых ускорений. Показано, что генерация спиральности в склоновых течениях, в принципе, может быть значительной.

2. Обсуждается новый механизм возникновения склоновых течений, связанный с пространственными неоднородностями коэффициентов турбулентного обмена. Если коэффициенты обмена зависят от расстояния до наклонной подстилающей поверхности (это характерно для турбулентного обмена), то в стратифицированной среде возникают горизонтальные неоднородности температуры и давления и, следовательно, склоновые течения.

3. Модель Прандтля обобщена на случай объемного тепловыделения в воздухе. Обнаружена нетривиальная возможность интенсификации склоновых течений при уменьшении угла наклона подстилающей поверхности.

4. Модель Прандтля обобщена на случай нелинейного (квадратичного) сопротивления и теплообмена на подстилающей поверхности. Стационарное решение задачи о течении над охлажденной наклонной поверхностью при таких краевых условиях может быть неединственным – при одних и тех же внешних условиях возможны разные стационарные режимы.

Литература:

1. Ингель Л.Х. Склоновые течения, обусловленные объемным тепловыделением // Инж.-физич. журнал. 2021. Т. 94 № 1. С. 169–173.
2. Ингель Л.Х. Стратифицированные течения, обусловленные пространственными неоднородностями коэффициентов обмена // Изв. РАН. Физ. атмос. и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 22–26.
3. Ингель Л.Х. О спиральности склоновых течений // Метеорол. и гидрол. 2024. № 9. С. 19–23.

Устойчивость верхних тропосферных течений и режим хаотических колебаний

Калашник М.В., Чхетиани О.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
ochkheti@ifaran.ru

Ключевые слова: бароклинная неустойчивость, вертикальный сдвиг скорости, экмановское трение, нелинейные колебания или васцилляции, режим хаотических колебаний

В рамках двухуровневой поверхностной квазигеострофической модели (SQG) исследуется гидродинамическая устойчивость верхнетропосферных зональных течений. Аналогичные течения наблюдаются в атмосфере Земли на уровне тропопаузы. Рассмотрена дискретная версия модели SQG для слоя атмосферы, содержащего две горизонтальные границы (подстилающую поверхность и тропопаузу). Уравнения модели получены при дискретной вертикальной аппроксимации оператора Лапласа. Модель аналогична классической модели Филлипса [1].

Для изучения нелинейной устойчивости использовался метод Галеркина с двумя базисными гармониками Фурье. Получена нелинейная система из трех уравнений для амплитуд гармоник Фурье. В отсутствие трения Экмана все решения системы описывают периодический режим нелинейных колебаний или васцилляций. Возникновение таких колебаний определяется законом сохранения поверхностной потенциальной энергии. Численные оценки периода этих колебаний дают значения порядка полумесяца и более, что согласуется с результатами анализа натурных данных для зимней атмосферы.

Наиболее интересные особенности возникают в двухуровневой модели с учетом экмановского трения. Решение трехуровневой модели неустойчивости с этим случае трением Экмана в режиме Галеркина демонстрирует сложное хаотическое поведение. Впервые такое поведение было обнаружено в знаменитой работе Э. Лоренца и многочисленных последующих работах Дж. Педлоски и Дж. Э. Харта. Для возникновения хаотического поведения необходимы два фактора - неустойчивость и трение Экмана. Результаты расчетов еще раз показывают, что модель с тремя модами достаточна для описания хаотического и околотурбулентного режимов. Хаотические осцилляции были обнаружены и ранее в нашей предыдущей работе по устойчивости течения Иди [2]. Это свидетельствует об универсальном характере хаоса в нелинейной модели с трением. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 23-17-00273).

Литература:

1. Phillips, N.A., Energy transformations and meridional circulations associated with simple baroclinic waves in a two-level, quasi-geostrophic model. Tellus 1954, 6, 274–286.
2. Калашник М.В., Чхетиани О.Г. Регулярные и хаотические колебания в геострофическом потоке с вертикальным сдвигом. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023, Т. 59, № 5, С. 560–568.

Особенности внутримассовой плавучести

Кочин А.В.

Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия

amarl@mail.ru

Ключевые слова: сила плавучести, внутримассовая выталкивающая сила, негидростатический градиент давления

Сила плавучести является причиной упорядоченных вертикальных перемещений в атмосфере, поэтому анализ причин и условий ее образования важен для понимания всех процессов атмосферного переноса. Из-за отсутствия жестких границ внутри газа горизонтальный градиент давления в статическом состоянии в малом по сравнению с окружающей средой объеме существовать не может. Распределение давления внутри объема газа с другой плотностью повторяет распределение внешнего давления и выталкивающая сила, как равнодействующая всех сил давления на внешнюю поверхность объема, формально равна нулю. Однако регистрируемая сила внутримассовой плавучести не равна нулю, а соответствует соотношению Архимеда для сред с разной плотностью. Следовательно внутримассовая выталкивающая сила может быть только объемной. В конечном объеме с отличающейся плотностью окружающая среда формирует вертикальный градиент давления в соответствии с внешней плотностью среды. Вертикальный градиент давления в объеме с иной внутренней плотностью имеет собственное значение, что нарушает гидростатическое равновесие. Наблюдаемая внутримассовая выталкивающая сила возникает из-за разницы вертикальных градиентов давления в средах с разной плотностью и является объемной, а не поверхностной. Величина силы плавучести определяется разницей вертикальных градиентов давления и массовой силой тяжести в объеме. Определенной подобным образом сила плавучести соответствует уравнению Архимеда для сред с разной плотностью. Полученные соотношения также соответствуют критериям CAPE (конвективная доступная потенциальная энергия) и CIN (энергия торможения конвекции) для прогнозирования формирования конвективных облаков.

Литература:

1. Doswell C.A. and Shultz D.M. 2006 On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteorology. <https://doi.org/10.55599/ejssm.v1i3.4>
2. Lima F M S. 2012. Using surface integrals for checking Archimedes' law of buoyancy. Eur. J. Phys. doi <https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/1/009>
3. Giancarlo Cavazzini 2018. A New Physical Interpretation of Archimedes' Principle. Journal of Applied Mathematics and Physics. <https://doi.org/10.4236/jamp.2018.61020>

Предвестники неустойчивости и положение предела устойчивости в присутствии шума

Кривоносова О.Э.¹, Жиленко Д.Ю.²

Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

olga@imec.msu.ru

Ключевые слова: шум, неустойчивость, сферическое течение Куэтта

Представлены результаты численных исследований как осесимметричных, так и трехмерных течений во вращающихся сферических слоях в присутствии шума. Шум вносится в течение путем добавления в сигнал скорости вращения внутренней сферы случайных во времени флуктуаций с нулевым средним значением. Установлено, что при внесении шума средние течения характеризуются более быстрым ростом меридиональной компоненты кинетической энергии течений по сравнению с азимутальной. Предложена аналитическая модель, объясняющая это явление. Впервые для гидродинамических течений наблюдались предвестники неустойчивости, известные из теории динамических систем с шумом – локальный минимум генерации средних течений и локальный максимум флуктуаций скорости течения на пределе устойчивости. Для трехмерных течений с шумом предложен новый метод, позволяющий на основе нелинейных расчетов определять положение предела устойчивости. Метод основан на анализе изменения во времени амплитуды колебаний скорости течения при переходе к числам Рейнольдса, меньших критического значения. Продемонстрирована возможность сокращения объема вычислений при использовании предлагаемого подхода.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00051.

Двухпараметрическая модель интенсивных атмосферных вихрей

Курганский М.В.¹, Ярынич Ю.И.^{1,2,3}

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский
вычислительный центр, Москва, Россия

³Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

kurgansk@ifaran.ru

Ключевые слова: интенсивные атмосферные вихри, пыльные вихри, смерчи, торнадо, турбулентная вязкость, диффузия углового момента, поток спиральности, вихрь Салливана

Исследовано двухпараметрическое семейство вихрей, в которых движение воздуха вблизи оси вихря отличается от твердотельного вращения, и тангенциальная скорость возрастает по степенному закону. Показано, что такие вихри удовлетворяют уравнению баланса углового момента, дополненному моделью турбулентной вязкости, включающей как традиционный механизм вихревой вязкости, так и механизм отрицательной диффузии углового момента в вихре. Особое внимание уделено восстановлению радиального профиля падения давления в вихре в явном аналитическом виде. Приведены примеры двухпараметрического представления вихрей как для дискретных, целочисленных значений параметров, так и для непрерывного спектра их изменений. Полученные результаты применены к суперчейковым смерчам (торнадо). Показано, что ширина полосы на поверхности земли, заметаемой вихрем при его перемещении, и определяемая из условия, что ветер имеет ураганную силу, систематически уменьшается, когда движение воздуха вблизи оси вихря отклоняется от твердотельного вращения. Использование нисходящего потока спиральности в вихре как меры интенсивности торнадо, а также в определенной степени их «разрушительной силы», подтверждает эти результаты. Обсужден вопрос о наилучшей аппроксимации в рамках обобщенного двухпараметрического семейства вихрей радиального профиля тангенциальной скорости в известном вихре Салливана.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 24-17-00357).

Турбулентный перенос синоптическими вихрями: полно-тензорный подход

Павел Берлов¹, Майкл Хэйг¹, Евгений Рыжов¹, Луолин Сан¹, Игорь Каменкович²,
Джеймс Мак Вильямс³

¹Имперский Колледж, Лондон, Великобритания

²Университет Майами, Корал Гейблс, Флорида, США

³Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США

p.berloff@imperial.ac.uk

Ключевые слова: океанские синоптические вихри, турбулентный перенос, параметризации

В геофизической турбулентности влияние мелкомасштабных движений на крупномасштабные часто формулируется в терминах турбулентной (вихревой) диффузии, характеризуемой коэффициентом вихревой диффузии. В этом контексте мы сосредоточились на переносе пассивных примесей, вызванном мезомасштабными океаническими вихрями, отмели любые упрощения и дополнительные предположения, и нашли полные коэффициенты-тензоры переноса. Обнаружены новые уровни сложности соответствующих тензоров, которые требуют переосмысления того, как вихревая диффузия и соответствующие меж-масштабные взаимодействия рассматриваются в наблюдениях, моделях общей циркуляции и теории.

Динамика, структура, энергетика и микроэнергетика периодических течений в атмосфере

Чашечкин Ю.Д.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
yulidch@gmail.com

Ключевые слова: волны, вихри и течения в атмосфере, теория сингулярных возмущений

В Инженерной математике – аксиоматической науке о принципах выбора символов, правил операций и критериев контроля точности расчеты состояния и динамики тонкоструктурной атмосферы и гидросферы проводятся на основе системы фундаментальных уравнений – дифференциальных аналогов законов сохранения вещества, импульса и энергии. Систему замыкают уравнения состояния для потенциала Гиббса и плотности [1], учитывающие влияние ассоциатов физической и химической природы – комплексов, клатратов, бондов, обладающих потенциальной поверхностной энергией. Гранулированная (зернистая) микроструктура среды непрерывно перестраивается, ее (зрительный образ – фотосфера Солнца. При формировании зерен поглощается тепловая и кинетическая энергия среды, при уничтожении формируются тонкие течения. Конверсия дополняет другие механизмы передачи энергии – радиационный, трансляционный с течениями, волнами и вихрями, и диссипативный.

Система анализируется с учетом условия совместности, определяющего ее ранг, численными и аналитическими методами теории сингулярных возмущений [1]. Определено минимальное число собственных функций, составляющих полное решение, удовлетворяющее граничным условиям. Рассчитаны дисперсионные соотношения акустических, капиллярно-гравитационных поверхностных и внутренних волн и сопутствующих лигаментов [2,3]. Обсуждаются методы контроля точности расчетов с применением расходящихся рядов. С учетом математических ограничений используется условие избыточности, позволяющее проводить сравнение результатов реализации независимых методик вычислений и экспериментов.

Разработаны методы оптических и контактных исследований течений, позволяющие регистрировать основные крупномасштабные компоненты – следы, волны, вихри, и выделять тонкие слои и волокна. Расчеты сравниваются с данными наблюдений течений в природных и лабораторных условиях акустическими, контактными и оптическими методами теневой визуализации и электролитической преципитации.

Литература:

1. Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. 10(4) 286.
2. Chashechkin Yu. D. Acoustics and hydrodynamics of the drop impact: two modes of sound packet emission // Techn. Phys., 2024. V. 69(1). P. 85–94.
3. Очиров А.А., Чашечкин Ю.Д. Двумерные периодические течения на поверхности несжимаемой жидкости в различных моделях среды // Изв. РАН. Физ. атм. океана. 2024, Т. 60, No. 1, С. 3–16.

Транзиентные моды в геофизической гидродинамике

Чхетиани О.Г., Гледзер Е.И., Калашник М.В.

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

ochkheti@gmail.com

Ключевые слова: транзиентные моды, сдвиговые течения, бароклинная неустойчивость, модель Иди, оптимальные возмущения, краевые бароклинные волны, уравнения Обухова-Чарни, волны Россби, протопланетные диски

Транзиентные моды впервые появились в задачах гидродинамической устойчивости сдвиговых течений. Они относятся к классу возмущений непрерывного спектра. Их характерной особенностью является интенсивный рост энергии на ограниченном интервале времени с последующим затуханием. С их существованием связывают подпороговый переход к турбулентности и её поддержание в аккреционных дисках, формирование полосчатых структур в пограничных слоях и субмезомасштабных структур в АПС. В геофизической гидродинамике такие моды рассматриваются с начала 80-х [1]. Транзиентные моды играют роль в энергетике циркуляции Хэдли с горизонтально неоднородным распределением температуры [2].

В квазигеострофическом уравнении Обухова-Чарни существует класс точных решений для волн Россби на зональном течении с постоянным горизонтальным сдвигом, для которых существует длительная квазистационарная стадия эволюции, на которой меридиональное волновое число и полная энергия практически не меняются со временем (блокирование) [3].

В течениях с горизонтальным и вертикальным сдвигом возникает новый класс краевых бароклиновых волн, для которых возможен немодальный рост энергии, образование неподвижных или заблокированных волн. Взаимодействие мод дискретного и непрерывного спектра может приводить к эффекту резонансного возбуждения бароклиновых волн [4].

В задаче Иди, как оказалось, существует только одна экспоненциально нарастающая нормальная мода, которая является оптимальным возмущением, волновое число которой моды отлично от волнового числа нормальной моды с максимумом роста [5].

При согласовании сдвигов скорости в бароклиновом потоке и наклонов рельефа также возможно блокирование [6]. Для волны с фиксированной частотой реализуется бимодальность: два решения с отличающимися зональной и меридиональной картинами поля скорости. Для упрощённых уравнений протопланетных дисков также имеют место стационарные решения для радиального волнового числа.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 23-17-00273).

Литература:

1. Mak M. Atmospheric dynamics. CUP. 2011. 500 p.
2. Гледзер Е.Б. Параметры подобия и центробежная конвективная неустойчивость горизонтально неоднородных циркуляций типа Хэдли // Изв. РАН. ФАО. 2008. Т.44. № 1, С. 36-47.
3. Чхетиани О.Г. и др. Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101(2). С. 84-89.
4. Калашник М.В. и др. Изв. РАН. ФАО. 2018. Т. 54. № 4. С. 361-370.
5. Kalashnik M.V. Chkhetiani O.G. J. Atm. Sci. 2018. V. 75(8). P. 2741-2761.
6. Гледзер Е.Б. и др. (напр. в ФАО).

Исследование активной конвекции с использованием расчетов потенциального вихря и спиральности

Юсупов Ю.И.

НПЦ «Мэп Мейкер», Москва, Россия

usupov@gismeteo.com

Ключевые слова: диполи потенциального вихря, интегральная спиральность, диполи спиральности

На примере катастрофического конвективного шторма, произошедшего в Москве и области 20 июня 2024 г., проведено исследование эволюции потенциального вихря и интегральной спиральности по информации сначала глобальной гидродинамической модели, а затем, негидростатической мезомасштабной модели. Сравнение модельных данных с информацией метеорологических радиолокаторов показало, что аномалия потенциального вихря синоптического масштаба может служить индикатором активной конвекции, увеличивая доступную потенциальную энергию и уменьшая энергию противодействия конвекции. Однако, для уточнения времени и места возникновения и развития активной конвекции, необходимо исследование на основе информации мезомасштабной негидростатической модели. Мезомасштабные потенциальные вихри в тропосфере в условиях конвекции в бароклинной зоне представляют из себя горизонтально ориентированные диполи положительных и отрицательных аномалий. Интегральная спиральность (0 – 3 км) в зонах активной конвекции также имеет дипольную структуру в виде положительных и отрицательных максимумов, причем, сравнение интегральной спиральности с объективным фронтальным анализом, показало, что отрицательная спиральность образуется в зоне холодных фронтов, положительная – в зоне теплых. Таким образом, спиральность может быть использована для исследования фронтогенеза и фронтальных структур. Учитывая, возникновение положительной обратной связи между мезомасштабным потенциальным вихрем и спиральностью в бароклинной зоне, предлагается использовать произведение градиента интегральной спиральности в слое от 0 до 3 км и градиента мезомасштабного потенциального вихря в средней тропосфере для определения зон возникновения опасных конвективных явлений – гроз, шквалов, сильных осадков.

Литература:

1. Копров Б. М. и др. Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности. //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015, Т. 51. № 6, С 637-647.
2. Chagnon J.M., Gray S.L. Horizontal potential vorticity dipoles on the convective storm scale. //Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2009. – vol. 135. -pp. 1392–1408.
3. Shiqiang F., Zhemин T. On the helicity dynamics of severe convective storms //Advances in Atmospheric Sciences. – 2001. – Т. 18. – №. 1. – С. 67-86.

Связь морского волнения с циклонической активностью в атмосфере Северного полушария по данным реанализа ERA5

Акперов М.Г.¹, Гиппиус Ф.Н.², Мохов И.И.^{1,2}

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

aseid@mail.ru

Ключевые слова: атмосферные циклоны, морское волнение, Северное полушарие, реанализ, тренды

На основе данных реанализа ERA5 для последних десятилетий (1940-2023 гг.) получены количественные оценки сезонных и региональных особенностей для значительной высоты волн в сопоставлении с изменениями циклонической активности в атмосфере Северного полушария. Сделаны оценки вклада внетропических циклонов в формирование соответствующих особенностей и изменений морского волнения. Максимумы повторяемости экстремального морского волнения зимой и летом соответствуют акваториям с повышенной повторяемостью циклонов, в частности, над Тихим и Атлантическим океанами. Получено, что вклад внетропических атмосферных циклонов в формирование значительных высот волн достигает 70% зимой и 50% летом. При этом наиболее сильный вклад связан с интенсивными циклонами - 90% зимой и 40% летом.

Региональные особенности изменения арктического морского льда в первой половине XX века по данным новой реконструкции и других наборов данных

Алдонина Т.А.^{1,2}, Семенов В.А.^{1,2}, Li F.³, Keenlyside N.S.^{3,4}, Wang L.⁵

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Geophysical Institute, University of Bergen and Bjerknes Centre for Climate Research, Берген, Норвегия

⁴Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Берген, Норвегия

⁵Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences,
Пекин, Китай

matania.777@gmail.com

Ключевые слова: арктические морские льды, климат Арктики, потепление середины XX века, климатическая изменчивость, арктические моря

Выполнена новая реконструкция данных о концентрации морского льда [1] для периода 1901–2019 гг. на основе связей между концентрацией морского льда и приповерхностной температурой воздуха, температурой поверхности океана и давлением на уровне моря. Реконструкция в том числе позволяет оценить региональные изменения площади морского льда (ПМЛ) в морях российской Арктике. Полученные данные могут сравниваться с имеющимися данными о состоянии морских льдов в исторический период.

Анализ региональных изменений ПМЛ с начала XX века, что для разных арктических морей потепление середины XX века проявилось в динамике ПМЛ по-разному, а в каких-то регионах и вовсе не проявилось напрямую. Наиболее значительные отрицательные аномалии в марте по данным восстановленного архива в период с 1930-1950 гг. отмечаются в Баренцевом море, море Баффина и Гренландском море, в сентябре – в морях российского сектора Арктики и в Центральной Арктике, отрицательная аномалия ПМЛ прослеживается также в Северо-Западных проливах Канадского арктического архипелага, в море Бофорта. В Беринговом, Гренландском морях, море Баффина в середине XX века прослеживались долгопериодные колебания без сильного сокращения ПМЛ, которые, вероятно, связаны с внутренней изменчивостью климатической системы.

Литература:

1. Reconstructed Arctic sea ice concentration data (1901-2019). Semenov, V. A., Aldonina, T. A., Li, F., Keenlyside, N. S., Wang, L. сайт: – Москва, 2024. URL: <http://www.ifaran.ru/DATA/IAPICE1.html>

О роли Солнца в формировании аномалий климата

Алексеев Г.В.¹, Лукьянова Р.Ю.^{2,1}, Глок Н.И.¹

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
alexgv@aari.ru

Ключевые слова: аномалии, светимость Солнца (TSI), температура воздуха, низкие широты, температура поверхности океана, Эль-Ниньо, температура

Глобальная приповерхностная температура воздуха (ПТВ), зафиксированная в 2023 году, оказалась наибольшей за весь период инструментальных наблюдений. Её появление поставило в тупик учёных [1]. Неопределенности добавляло и отсутствие подобной аномалии в высоких широтах Северного полушария [2], где должно наблюдаться арктическое усиление. Среди рассмотренных причин отсутствует влияние светимости Солнца (TSI), вызываемых колебаниями активности Солнца, поскольку считается, что заметное влияние на климат оказывают 11-летние и более длительные циклы солнечной активности [3]. В докладе приведены результаты исследования связи аномалий светимости Солнца, температуры поверхности океана (ТПО) и аномалий климата. Для исследования привлечены массивы и ряды данных о ежедневных значениях TSI с 1947 по 2024 год [4] и расчёты инсоляции верхней границы Земли [5]. Изменчивость среднемесячных значений ТПО в низких широтах оценивается по многолетним рядам индексов с 1948 года по настоящее время на сайте NOAA [<https://psl.noaa.gov/>]. Среднемесячные значения приповерхностной температуры воздуха, осредненные по широтным зонам и по земному шару, рассчитаны по данным реанализа NCEP/NCAR [<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>]. При исследовании использованы методы статистики, анализа временных рядов и комбинаторики. Началом глобальной аномалии температуры воздуха в 2023 году послужило формирование аномалий ТПО в низких широтах, которым соответствует самая мощная за период наблюдений аномалия TSI. При этом ряду аномалий TSI, в периоды весеннего и осеннего равноденствий на максимумах солнечной активности, соответствуют аномалии ТПО в низких широтах, что указывает на участие аномалий TSI в формировании событий Эль-Ниньо.

Литература:

1. Voosen P. The hottest year was even hotter than expected.. Science, Vol 383, Issue 6679. P.134.
2. Алексеев Г.В. и др. О климате Арктики в 2023 году — глобально самом теплом за период наблюдений. РПИ. № 1, 2024, 22-23
3. Gray, L. J. et al. (2010), Solar influences on climate, Rev. Geophys., 48, RG4001.
4. S. Dewitte and S. Nevens, "The Total Solar Irradiance Climate Data Record", 2016 ApJ 830 25.
5. Костин А.А., Фёдоров В.М. <http://www.solar-climate.com/sc/mttd.htm>

Изменения характеристик летних осадков разного временного разрешения в Сочи в последние десятилетия

Алешина М.А.^{1,2}, Семенов В.А.^{1,2}, Воронцова В.А.^{1,2}, Акперов М.Г.², Чернокульский А.В.^{1,2},
Швец Н.В.³

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных, Обнинск, Россия
aleshina_maria@mail.ru

Ключевые слова: экстремальные осадки, Сочи, изменения климата, метеорологические станции, реанализ ERA5, плювиограф

В Сочи в последние годы растет число опасных гидрометеорологических явлений с существенным ущербом, в том числе связанных с осадками. В работе выполнен анализ характеристик осадков на разных временных масштабах (10 минут, 1 час, 12 часов, сутки) в Сочи за последние десятилетия. Анализ режима осадков в регионе важен для улучшения прогноза таких явлений и разработки мер по уменьшению уязвимости населения и экономики региона.

В работе используются срочные наблюдения на метеостанции Сочи архива ВНИИГМИ–МЦД и часовые данные реанализа ERA5 в 1980–2023 гг. Также проведен анализ данных плювиографа на метеостанции Сочи, которые представляют собой записи интенсивности осадков (в мм/10 минут) для событий дождя, т.е. периодов, когда осадки выпадали без перерывов или с перерывами не более 1 часа.

Анализ данных метеостанции и ERA5 показал, что летом в Сочи отмечается уменьшение сезонных сумм осадков на 4–5%/10 лет (для метеостанции статистически не значимое), при этом изменения интенсивности, максимальных значений и повторяемости экстремальных осадков не обнаружены. По данным плювиографа получено уменьшение продолжительности событий дождя, которое достигается за счет уменьшения доли пропусков (периодов менее 1 часа без осадков). Уменьшение продолжительности осадков отмечено и при анализе часовых данных в ERA5. Также получено уменьшение интенсивности экстремальных осадков при повышении температуры при анализе данных с временным разрешением от часового до суточных сумм. Использование линейной аппроксимации оправдано лишь при анализе данных плювиографа, в которых экстремальные осадки при более высоких температурах характеризуются в среднем более высокой интенсивностью согласно соотношению Клаузиуса–Клапейрона.

Таким образом, в Сочи не отмечается значимого усиления осадков, а увеличение экономического ущерба от неблагоприятных погодных явлений может быть связано с развитием экономики и ростом населения, что указывает на важность мер адаптации к опасным явлениям погоды в регионе.

Развитие системы ансамблевого среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ

Алипова К.А.^{1,2}, Мизяк В.Г.¹, Толстых М.А.^{2,1,3}, Гойман Г.С.^{2,3,1}

¹Гидрометцентр России, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
ksusha_ast@mail.ru

Ключевые слова: ансамблевый среднесрочный прогноз погоды, неопределенность, модель атмосферы

В работе рассматривается обновленная версия системы среднесрочного ансамблевого прогноза погоды (САП), основанной на локальном ансамблевом фильтре Калмана с преобразованием ансамбля [1] и глобальной модели атмосферы ПЛАВ [2]. Используется версия модели ПЛАВ20 с горизонтальным разрешением $0,225^\circ$ по долготе; переменным разрешением по широте – от $0,24^\circ$ во внетропической части Южного полушария до $0,16^\circ$ в средних широтах Северного полушария. По вертикали модель имеет 51 уровень, верхняя граница - 5 гПа (примерно 36 км).

Для учета неопределенностей в блоке параметризаций процессов подсеточного масштаба в предыдущей версии САП было реализовано стохастическое возмущение параметров и тенденций параметризаций [3]. В новую версию САП добавлен учет неопределенностей, возникающих при численном решении системы уравнений динамики атмосферы, для чего применяется метод стохастического возмущения полулагранжевых траекторий [4]. Показано, что применение комбинации указанных методов в САП на основе ПЛАВ20 позволяет улучшить вероятностные оценки прогнозов по сравнению с предыдущей версией САП. Кроме того, разброс ансамбля в новой САП стал больше соответствовать среднеквадратической ошибке среднего по ансамблю прогноза [5].

Также для САП подготовлена обновленная система верификации прогнозов, в которой учтены современные требования ВМО к среднесрочным ансамблевым прогнозам, в частности, осадков.

Исследование выполнено в ИВМ РАН при поддержке Российского научного фонда (проект 21-71-30023).

Литература:

1. Shlyayeva A. et al. // Russ. J. Num. An. Math. Mod., 28(4), 2013, 419-441.
2. Толстых М.А. и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. 2017. М.: Триада лтд, 166 с.
3. Alipova K. et al. // Russ. J. Num. An. Math. Mod. 37(6), 2022, 331-347.
4. Alipova K. et al. // Russ. J. Num. An. Math. Mod. 39(1), 2024, 1-11.
5. V. Fortin et al. // J. Hydrometeorol. 15(4), 2014, 1708-1713.

Событийный анализ аномалий циркуляционного режима в феврале 2024: процессы тропосферно-стратосферного взаимодействия и результаты самолетного зондирования

Антохина О.Ю.^{1,2}, Антохин П.Н.¹, Белан Б.Д.¹, Зоркальцева О.С.², Гочаков А.В.³, Артамонов М.Ф.²

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

³Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

antokhina@iao.ru

Ключевые слова: аномалия температуры, Арктика, циркуляция, внезапные стратосферные потепления, атмосферные блокирования, интрузия, озон

Февраль 2024 года стал самым теплым за весь период инструментальных наблюдений, однако юг Сибири столкнулся с аномально низкими температурами, достигающими – 40°C. При этом наблюдался аномальный режим "Теплая Арктика – Холодная Евразия" (ТАХЕ). Данная работа посвящена установлению причин этой аномалии. Анализ взаимодействия стратосферы и тропосферы показал, что возникновение аномалии ТАХЕ происходило синхронно с ослаблением стратосферного полярного вихря (СПВ) и внезапным стратосферным потеплением (ВСП) во второй половине февраля 2024 года. Мы подтвердили выводы, что влияние ослабления СПВ на аномалии в тропосфере происходит не только после событий ВСП, но и сами процессы ВСП, сопровождаясь аномально сильным стратосферно-тропосферным обменом, могут вызывать сильные локализованные пролонгированные похолодания в тропосфере над Сибирью. Эти выводы подтверждаются как результатами расчета потоков волновой активности на основе данных реанализа, так и данными инструментальных наблюдений, полученными при помощи самолетного зондирования. Наше исследование показало, что сложное взаимодействие между тропосферой и стратосферой играет важную роль в формировании и усилении климатических аномалий, таких как ТАХЕ в зимний период.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИОА СО РАН, сведения о динамике стратосферы получены при частичной поддержке гранта РНФ 22-77-10008 Исследования крупномасштабных явлений в нижней и средней атмосфере и оценка их локального проявления на высотах мезосферы-нижней термосферы

Изменения площади снежного покрова в Евразии в XXI веке по модельным расчетам и данным наблюдений

Аржанов М.М.¹, Мохов И.И.^{1,2}, Парфенова М.Р.¹

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

arzhanov@ifaran.ru

Ключевые слова: площадь снежного покрова, глобальные климатические модели

Проведен анализ изменений площади снежного покрова в Евразии в XXI веке с использованием результатов расчетов с глобальными климатическими моделями проекта CMIP6 в сопоставлении со спутниковыми данными CDR. Показано, что при увеличении приповерхностной температуры на 1K в годовом ходе площадь снежного покрова уменьшается на 0.93 ± 0.01 млн км² по модельным оценкам и на 1.13 ± 0.01 млн км² по данным спутниковых наблюдений. Отмечено, что средние для ансамбля моделей оценки параметра температурной чувствительности площади снежного покрова к изменениям приповерхностной температуры для осенних и весенних месяцев могут быть значительно меньше по абсолютной величине, чем полученные по данным наблюдений и для отдельных моделей. Показано, что диапазон межмодельных различий площади снежного покрова (более 6 млн км² в зимние месяцы) превышает диапазон межгодовых вариаций площади по спутниковым данным за 2000-2019 гг. В связи с выявленными особенностями воспроизведения площади снежного покрова моделями проведены ансамблевые расчеты с учетом индивидуальных весов моделей с использованием байесова подхода. Показано, что при использовании байесовых весов неопределенность оценок площади снежного покрова может быть уменьшена вдвое по сравнению с ансамблевым средним при равных весах моделей.

Развитие методов краткосрочного ансамблевого прогнозирования в Гидрометцентре России

Астахова Е.Д.¹, Бундель А.Ю.¹, Розинкина И.А.^{1,2}, Ривин Г.С.^{1,2}, Алферов Д.Ю.¹, Алферов Ю.В.¹,
Копейкин В.В.¹, Волкова В.А.¹

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

elena_ast_hmc@mail.ru

Ключевые слова: ансамблевый прогноз, система регионального ансамблевого прогноза высокого разрешения, возмущения модели

Глобальные ансамблевые системы фокусируются на описании неопределенностей прогнозов на синоптическом масштабе. Для представления неопределенностей на меньших пространственно-временных масштабах, то есть в локальной погоде, применяются системы регионального ансамблевого прогнозирования, основанные на применении негидростатических моделей с шагом сетки 1-3 км, позволяющем явно разрешить глубокую конвекцию. Они позволяют давать более точные и подробные вероятностные прогнозы, предоставляют широкий набор прогностической продукции и помогают при принятии решений в случае угроз быстроразвивающихся погодных процессов (сильные осадки, перепады температур, сильные порывы ветра, развитие интенсивной конвекции).

В Гидрометцентре России с 2013 года ведутся работы по мезомасштабному ансамблевому прогнозированию с высоким пространственным разрешением на основе моделей COSMO и ICON, а также развиваются методы верификации вероятностных прогнозов высокой детализации. Рассмотрено несколько вариантов организации ансамблевых систем по ограниченной территории. Исследовано влияние возмущений модели и размера ансамбля на вероятностный прогноз, проанализирован потенциал использования мультимодельных и лагированных прогнозов. Показаны возможности и преимущества применения системы METplus для многофакторной верификации ансамблевого прогноза.

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).

Наукастинг глубокой влажной конвекции с использованием спутниковых данных

Баданов А.Ю., Юсупов Ю.И.
НПЦ «МЭП Мейкер», Москва, Россия
badanov@gismeteo.com

Ключевые слова: детектирование глубокой влажной конвекции, опасные явления, наукастинг, спутниковая метеорология, яркостная температура, грозопеленгатор, метеорадар

Сверхкраткосрочные прогнозы (наукастинг) опасных конвективных явлений в настоящее время в основном производятся с помощью обнаружения этих явлений радиолокаторами и последующим перемещением зон этих явлений по экстраполяционному методу или по ведущему потоку [1]. Однако, в связи с тем, что сеть метеорологических радаров покрывает не всю территорию России, а плотность расположения метеорологических радаров в зоне покрытия неодинакова, решение задачи оперативного прогноза опасных явлений, связанных с конвективными процессами в атмосфере, на всей территории России становится затруднительным. Использование данных, получаемых с геостационарных метеорологических спутников, помогает решить проблему, так как в зону видимости спутников попадает вся территория России, что особенно важно для нужд авиации.

Мультиспектральный спутниковый анализ сыграл важную роль в понимании свойств конвективных грозовых облаков: различные измерения на длинах волн в инфракрасном (ИК) диапазоне и комбинации между ними были использованы для оценки стадии развития облаков, высоты и температуры верхней границы облачности [2].

В данной работе на примере конвективного сезона 2023 года с мая по сентябрь в южных регионах России показывается, что детекция конвективных систем с помощью данных геостационарных спутников может быть достаточно качественной, о чём свидетельствуют значения критериев Пирси-Обухова и Хайдке [3] в интервалах значений от 0,3 до 0,8 и от 0,3 до 0,55 соответственно. Также приведены таблицы сопряжённости, некоторые другие критерии качества оценки детекции [3]. На географических картах показаны спутниковые области глубокой влажной конвекции вместе с данными радаров, грозопеленгаторов и метеостанций.

Технология наукастинга глубокой влажной конвекции включает не только детекцию, но также и прогноз перемещения конвективной системы и связанных с ней опасных явлений с помощью алгоритма оптического потока optical flow. Предсказание перемещения производится с заблаговременностью до 3ч.

Литература:

1. Юсупов Ю. И. Комплексная система наукастинга для авиации в технологии ГИС Метео. //Метеоспектр. – 2016. No4. – 72 – 81.
2. Carlos Pinto Da Silva Neto et al., A method for convective storm detection using satellite data, *Atmósfera* 29(4), 343-358 (2016)
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ, Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов, РД 52.27.284—91, Госгидромет СССР, 1991

О корреляции внутривековых колебаний длительности суток, сильной сейсмической активности и Эль-ниньо

Безверхний В.А.

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

vabezv@mail.ru

Ключевые слова: *сейсмичность, длительность суток, Эль-Ниньо, кросс-корреляция*

Установлено, что между аномалиями длительности суток (LOD), вариациями ежегодного числа (Neq) сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 5$ и температурой поверхности Тихого океана в регионе Nino3.4 (TNiño3.4), существует сильная взаимная корреляция на внутривековом масштабе вариаций от 20 до 90 лет. Представлена модель в виде суммы 3 гармонических колебаний с периодами 22, 33 и 66 лет, которая хорошо согласуется с внутривековыми колебаниями в столь разнородных характеристиках, как колебания скорости вращения Земли, сильная сейсмическая активность и температура поверхности экваториальной части Тихого океана.

Исследование структуры и циркуляции зонального участка летнего струйного течения над акваторией Северной Атлантики и Великобритании

Безотеческая Е. А.^{1,2}

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

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский университет, Санкт-Петербург, Россия

eabezotcheskaya@aari.ru

Ключевые слова: верхнетропосферные струйные течения, модельные данные, данные радиозондирования

Выходные параметры атмосферных моделей позволяют получить более детальную пространственную структуру струйных течений по сравнению с полями реанализа и профилями радиозондирования. С использованием данных модели WRF-ARW, рассчитанных в узлах сетки с шагом 23.5 км на 45-ти вертикальных уровнях с верхней границей равной 50 гПа, представлены характеристики типичного случая зонального струйного течения, наблюдавшегося над Северной Атлантикой и Великобританией в июле 2017 года. Анализ полей ветра средней и верхней тропосферы, а также нижней стратосферы трех синоптических сроков в период с 26 по 28 июля показывает наличие от 3 до 12 максимумов скорости, локализующихся на различных высотах и отличающихся по интенсивности и протяженности. Все максимумы обнаруживаются в системе единого струйного течения, ограниченной изотаксой 30 м/с.

В большинстве рассмотренных эпизодов поверхность наибольшего ветра расположена выше на антициклональной стороне (11-13 км), и, соответственно, ниже на циклонической стороне струйного течения (9-11 км). Перепад высоты оси струйного течения вдоль потока может варьироваться от 25 м до 3 км, в зависимости от ее протяженности и интенсивности.

Приводятся значения вертикальных скоростей на уровне поверхности наибольшего ветра. Отмечается неоднородный характер распределения нисходящих и восходящих движений со значениями скорости, главным образом лежащими в диапазоне от -6 до 6 см/с. Наиболее высокие значения, превышающие 9 см/с, получены на циклонической стороне в области выхода интенсивного струйного течения.

Сравнение вертикальных профилей скорости ветра, построенных по данным радиозондирования и по модельным данным, указывает на различное воспроизведение географического положения максимумов скорости, которое в некоторых случаях может достигать 300 км. В данном случае выбор начальных данных для дальнейших расчетов модели играет важную роль.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23–17–00273).

Учет биоклиматических факторов при оценке потребности теплоснабжения городов юга Западной Сибири

Белова И.Н.¹, Гинзбург А.С.¹, Докукин С.А.^{1,2}, Фалалеева В.А.¹

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

iva@ifaran.ru

Ключевые слова: города Западной Сибири, биоклиматические индексы, теплоснабжение, HDD, PET

Работа посвящена учёту биоклиматических факторов при оценке потребности теплоснабжения городов юга Западной Сибири. Сибирь является широтным географическим центром России, что с точки зрения связности страны, равномерного распределения различных сетей, природных ресурсов и способов их доставки является большим преимуществом данного региона.

Наиболее распространенными климатическими показателями потребления энергии на обогрев помещений являются характеристики дефицита тепла, обычно называемые градус-сутками отопительного сезона (heating degree days – HDD) [1, 2], которые рассчитываются для определенного периода года путём суммирования абсолютных отклонений средней суточной температуры воздуха от выбранной базовой температуры.

Работа является продолжением исследования [3], в котором рассматривались крупные города европейской части России. В городах восточной части России низкие температуры воздуха и суровые зимние условия существенно влияют на общий тренд HDD и PET (по данным из [4]).

В докладе сравниваются результаты расчета трендов HDD сибирских городов Кемерово, Кызыл, Новокузнецк, Новосибирск, Омск, Рубцовск, Тайга, Томск, Барнаул. Показано, что на юге западной Сибири по сравнению с городами европейской части России и Дальнего Востока HDD более стабильны.

Литература:

1. Гинзбург А.С., Решетарь О.А., Белова И.Н. 2016. Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика, 9, с. 20–27.
2. Belova I.N. et al 2018 Energy Procedia 149 373-379
3. Гинзбург А.С., Белова И.Н., Докукин С.А., Фалалеева В.А. 2024. Влияние тренда скорости ветра на продолжительность периода термического комфорта на европейской части России в последние десятилетия // Метеорология и гидрология, 2, с. 38-47.
4. Konstantinov P.I. et al. NorthEurasian thermal comfort indices dataset (NETCID): New gridded database for the biometeorological studies // Environ. Res. Lett. 2022. 17 085006

Градовые события в России: климатология и анализ условий формирования

Бугримов А.В.^{1,2}, Чернуковский А.В.^{1,3}, Давлетшин С.Г.⁴, Спрыгин А.А.^{1,5}, Шихов А.Н.^{1,6}, Ярынич Ю.И.^{1,2}

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт географии РАН, Москва, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, Обнинск, Россия

⁵Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия

⁶Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
alexseybug@gmail.com

Ключевые слова: град, сигнатуры, индексы неустойчивости, данные ERA5

Град — опасное атмосферное явление конвективного характера, которое может нанести существенный социально-экономический ущерб. Происходящие изменения климата приводят к интенсификации градовых событий в ряде российских регионов. При этом, статистика таких событий остается недоизученной. В рамках данного исследования на основе различных источников была создана база данных о событиях града в России, которая включает на данный момент 6620 случаев града с 1906 по 2024 гг. и содержит информацию о месте и времени события, для ряда событий — о размере града, связанном с выпадением града ущербом.

Получены оценки распределения града по размеру (диаметр D), в частности, медианное значение D в представленной выборке (для 4447 событий, имеющих информацию о граде) составляет 3 см, а 95-й процентиль — 7 см. . Оценено пространственно-временное распределение града: выявлены области с максимальной повторяемостью града, в том числе града с $D > 10$ см. Отмечено, что пик сезона выпадения града приходится на июнь. Оценены условия атмосферы, характерные для выпадения града. Для этого исследованы термодинамические и динамические индексы по выборке случаев града за 2010–2020 гг. (июнь-июль), рассчитанные поданным реанализа ERA5. Выявлена значимая зависимость индексов от наличия и размера града. В качестве наиболее информативных параметров можно выделить индексы WMAXSHEAR и 3D.

Для градовых событий 2024 г. оценена взаимосвязь выпадения града и наличия характерных особенностей на верхней границе конвективных облаков («сигнатур»), таких как сигнатуры пробоя тропопаузы, холодные кольцевые и U/V-образные структуры в поле ТВГО по снимкам прибора SEVERI спутника Meteosat-8. Установлено, что сигнатура пробоя тропопаузы наблюдается в 75% случаев выпадения града, а сигнатура Cold-R/U/V — только в 30%.

Об универсальных статистических закономерностях шквальных ветров

Вазаева Н.В.^{1,2}, Чхетиани О.Г.¹, Голицын Г.С.¹

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

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

vazaevanv@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, шквалы, статистические характеристики, данные наблюдений, высотная метеорологическая мачта, численное моделирование

Вопросы диагностики основных характеристик шквалов – экстремальных погодных явлений локального, внезапного характера – и примерная оценка наносимого ими ущерба остаются чрезвычайно актуальными в контексте увеличения точности оперативного прогнозирования и выяснения причин их формирования и развития, которые до сих пор недостаточно изучены. С использованием большого массива данных по скорости и направлению ветра с высотной метеорологической мачты (ВММ) ФГБУ «НПО «Тайфун» за 2014-2024 гг. с достаточной достоверностью получены первые результаты по статистическим распределениям основных диагностических характеристик: скорости – резкое усиление которой и являлось, в том числе, критерием выделения шквала, – энергии и мощности ветра, являющихся индикаторами разрушительной силы, которая, в свою очередь, может привести к ощутимому ущербу экономике. Для разных и никак не связанных между собой событий усиления ветра изменения максимальной и осредненной скорости, энергии, мощности от масштаба, а также энергии и мощности от осредненной скорости, описываются универсальными степенными зависимостями с вероятностью примерно 95-98%. Авторы предполагают здесь связь с причинами формирования шквалов и сопутствующих им турбулентности и когерентных структур.

Получена оценка масштабов и энергий разрушения исследуемых экстремальных событий. Используя теорию Колмогорова 1934 г. [1], оценка поперечного масштаба шквала по данным измерений одной мачты в среднем больше продольного в 3-4 раза. Для выводов более точного соотношения можно воспользоваться результатами численного моделирования, например, сделанного в [2] с использованием WRF, адаптированной для района наблюдений, где пространственные размеры отличаются в несколько раз. По размерам шквалов можно оценить энергию разрушений через их характерные времена и форсинги.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 23-17-00273).

Литература:

1. Kolmogorov A.N. Zufallige Bewegungen // Annals of Mathematics. 1934. V. 35. P. 116–117.
2. Вазаева Н.В. Кулижникова Л.К., Мацкевич М.К. Диагностика шквалов при прохождении через высотную метеорологическую мачту в г. Обнинск в 2014-2023 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. (в печати).

Особенности динамики нижней стратосферы Арктики в конце зимнего сезона по данным реанализа и моделирования

Варгин П.Н.^{1,2,3}, Коваль А.В.^{3,4,5}, Гурьянов В.В.^{3,6}, Володин Е.М.⁷, Розанов Е.В.^{5,8}

¹Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Кафедра метеорологических прогнозов РГГМУ, Санкт-Петербург, Россия

⁴Кафедра физики атмосферы СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

⁵Лаборатория исследования озонового слоя и верхней атмосферы СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

⁶Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

⁷Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

⁸Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center, Davos, Switzerland

p_vargin@mail.ru

Ключевые слова: планетарные волны, озоновый слой, остаточная меридиональная циркуляция, динамическое взаимодействие стратосферы и тропосферы, внезапные стратосферные потепления. Механизмы межгодовой и внутрисезонной изменчивости динамики зимней стратосферы Арктики, определяющей состояние озонового слоя и влияющей на тропосферу, остаются в фокусе исследований. Основной причиной этого является высокая изменчивость стратосферного полярного вихря, зависящая от распространяющихся из тропосферы потоков волновой активности, их нелинейного взаимодействия с циркуляцией стратосферы и собственных осцилляций стратосферы. С использованием данных реанализа, расчетов современного климата с 1965 г. по 2014 г. и климата будущего на климатической модели ИВМ РАН CM5 и химико-климатической модели SOCOLv4 по умеренному и жесткому сценариям роста парниковых газов (SSP2-4.5, SSP5-8.5) с 2015 г. по 2100 г. выявлена связь амплитуды планетарной волны с зональным числом 1 в нижней высокоширотной стратосфере в феврале и минимальной температуры нижней полярной стратосферы в марте: коэффициент корреляции для модельных расчетов для настоящего и будущего климата составляет ~0.5, а для данных реанализа NCEP и ERA5 с 1979 г. ~0.67. Анализ композитов из 10 сезонов с наибольшей и наименьшей минимальной температурой нижней стратосферы Арктики в марте показал, что в «теплые» сезоны по сравнению с «холодными» наибольшее усиленное распространение вертикальных потоков волновой активности в феврале наблюдается в нижней стратосфере над Северной Атлантикой. Составленные композиты характеризуются отсутствием доминирования какого-либо из основных внешних климатических факторов, способных влиять на зимнюю стратосферу Арктики (КДК / ЭНЮК / ОМД). В «холодные» сезоны в полярных широтах над севером Канады в верхней тропосфере – нижней стратосфере наблюдается отражение волновой активности. В «теплые» сезоны, помимо собственно нагрева приполярной стратосферы в феврале, наблюдается усиление нисходящей ветви остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ). Основной вклад в это усиление вносит усиление волновой активности, ведущее к ускорению вихревых компонент ОМЦ, генерируемых волнами.

Литература:

1. Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели INM-CM5 // Изв. РАН. Физ. атм. океана, 2020
2. Koval A., et al. Modelling the residual meridional circulation at different stages of SSWs // Ann. Geophys., 2021
3. Sukhodolov T., et al. Atmosphere–ocean–aerosol–chemistry–climate model SOCOLv4.0. GMD, 2021
4. Vargin P., et al. Arctic stratosphere changes in the 21 century in the Earth system model SOCOLv4 // Front. Earth Sci., 2023

Долгопериодная изменчивость и предсказуемость волн тепла и холода

Вильфанд Р.М., Куликова И.А., Хан В.М., Макарова М.Е.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

romanvlfand@mail.ru

Ключевые слова: *долгопериодная изменчивость, предсказуемость, волны тепла и холода*

Рассмотрены основные определения и количественные характеристики волн тепла и холода. По данным реанализа ЕЦСПП ERA5 с использованием теста Манна-Кендалла выявлены статистически значимые положительные (отрицательные) тренды с доверительной вероятностью 95% в изменениях продолжительности и пространственной протяженности волн тепла (холода) в летний и зимний периоды в Северном полушарии на интервале времени 1961-2020 гг. Показано, что распределения рекомендованных ВМО индексов WSDI и CSDI, характеризующих соответственно волны тепла и холода, существенно отличаются от нормального и имеют специфические структурные особенности, характерные для вероятностных распределений экстремальных величин. С использованием ретроспективных прогнозов (1991-2015 гг.) новой усовершенствованной версии глобальной модели атмосферы Гидрометцентра России и ИВМ РАН ПЛАВ072L96 с помощью методов пространственной верификации продемонстрирована зависимость качества прогнозов от пространственных масштабов волн тепла и холода. Результаты расчетов свидетельствуют, что оценки качества прогнозов сильно варьируют в зависимости от наблюдаемой частоты явления. В историческом ракурсе на фоне увеличения (уменьшения) продолжительности и повторяемости волн тепла (холода) отмечается тенденция к повышению (ухудшению) качества их прогнозов. Особое внимание уделяется анализу синоптической ситуации, соответствующей волнам тепла довольно редкой продолжительности и интенсивности в августе-сентябре 2024 г.

Алгоритм учета продолжительности залегания снега в кронах деревьев для выявления «эффективной» границы снежного покрова для численного прогнозирования погоды (на основе COSMO-Ru)

Волков И.О., Розинкина И.А., Копейкин В.В.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

gorkinson@yandex.ru

Ключевые слова: снежный покров, модели атмосферы, начальные данные для численного прогноза погоды, подстилающая поверхность суши

В моделях атмосферы подстилающая поверхность суши представляет собой сочетание поверхностей различных свойств, в частности, поле, леса, городской застройки и т. д. Эти поверхности также по-разному удерживают на себе снежный покров. Задание начальной информации для численного прогноза погоды (ЧПП) базируется на данных наблюдений на метеостанциях о высоте снега (расположенных на открытой местности, где снежный покров разрушается существенно позже, чем на кронах деревьев). Однако именно наличие/отсутствие снега на кронах является важнейшей характеристикой, определяющей теплообмен с атмосферой и формирующей температурный режим приземного слоя. В солнечные дни весной при больших потоках солнечной радиации открытые кроны могут беспрепятственно нагреваться (в отличие от покрытых снегом поверхностей, где все получаемое тепло идет на таяние снега) и прогревать воздух. Недоучет этого механизма при формировании начальных полей снежного покрова приводит к существенным ошибкам прогнозирования приземной температуры в течение весеннего периода.

В данной работе предложен алгоритм учёта формирования и последующего разрушения перехваченного снега пологом лесной растительности для использования результатов в блоках создания начальных данных для модели численного прогноза погоды (эксперименты выполнены на основе конфигураций COSMO-Ru Гидрометцентра России). За основу были взяты статистические соотношения, полученные путем сравнения результатов синхронных снегомерных съемок в лесу и на открытой местности. Алгоритм корректирует результаты объективного анализа, построенного на основе данных измерений метеостанций, с учетом площади лесных массивов в ячейках и анализа температурного режима данной точки/ячейки в течение всего периода снегозалегания. Численные эксперименты показали эффективность применения данного подхода и снижение ошибки прогностических расчетов T2m.

Исследование проведено в рамках научно-исследовательской работы Росгидромета AAAA-A20-120021490079-3.

**Модель климата ИВМ РАН. Современное состояние,
перспективы развития, вероятное участие в следующей фазе
международного сравнения климатических моделей**

Володин Е.М.¹, Грицун А.С.¹, Брагина В.В.¹, Черненко А.Ю.^{1,2}, Тарасевич М.А.^{1,2}

¹Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия
volodinev@gmail.com

Ключевые слова: модель, климат, изменение, параметризация, сравнение, воздействие, эксперимент

Рассматриваются усовершенствования описания физических процессов в модели климатической системы, произошедшие в последние несколько лет, и ближайшие ожидаемые изменения, включая усовершенствование описания облачности поверхности суши, углеродного цикла. Это привело и к изменению воспроизведения современного климата, а также вероятных будущих изменений климата. Претерпел значительные изменения и программный комплекс модели, что открывает новые возможности по совместному выполнению численных экспериментов и развитию модели большим коллективом разработчиков. Изменения произошли и в наборе численных экспериментов, которые предполагается выполнить в рамках следующей фазы международного сравнения климатических моделей CMIP7. В частности, выделен блок "быстрых" экспериментов, выполнение которых согласовано с подготовкой очередного Оценочного Доклада МГЭИК. В списке экспериментов гораздо большее внимание, чем раньше, уделяется методическим экспериментам, в частности, экспериментам по вычислению эффективных радиационных воздействий.

Прогнозируемые изменения главных мод долгопериодной климатической изменчивости в XXI веке моделью Земной системы ИВМ РАН

Гвоздева А.В.^{1,2}, Гущина Д.Ю.^{1,2}, Мухартова Ю.В.^{1,2}, Володин Е.М.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

gvozdevaav@my.msu.ru

Ключевые слова: Эль-Ниньо, изменение климата, модельный эксперимент, удаленный отклик на ЭНЮК, циркуляционная изменчивость

Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК) – наиболее яркий феномен межгодовой климатической изменчивости, являющийся результатом взаимодействия тропического Тихого океана и атмосферы. В предыдущих исследованиях показано, что события двух типов Эль-Ниньо в значительной степени изменяют атмосферную циркуляцию в полярных широтах [1].

Характеристики феномена ЭНЮК зависят от фонового состояния системы океан-атмосфера, которое существенно меняется в условиях изменения климата. Изучение отклика на ЭНЮК в будущем климате возможно с использованием модельных экспериментов, что обуславливает необходимость оценки способности моделей воспроизводить этот отклик в современном климате.

В данном исследовании для оценки воспроизведения в настоящем климате крупномасштабных мод циркуляционной изменчивости и удаленного отклика на события Эль-Ниньо были использованы данные реанализа ERA5 и российской модели Земной системы ИВМ РАН – INM-CM «исторического» эксперимента с 1985 по 2014 гг. Для анализа их модификации в будущем климате были использованы данные модели с 2071 по 2100 гг.: 5 членов ансамбля для сценариев SSP 1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 и 3 члена ансамбля для сценария SSP 5-8.5.

В будущем климате ожидается ослабление Арктической и Антарктической осцилляций, Североатлантического и Тихоокеанского-Северо-Американского колебаний, а последствия событий Эль-Ниньо станут более ощутимыми в арктических регионах. При этом отклик на события Эль-Ниньо будет проявляться не только в изменении динамики основных центров действия атмосферы, но и в значительном повышении приземной температуры воздуха — в несколько раз больше, чем в нынешнем климате. Таким образом, удаленный отклик на сигнал в тропиках может усиливать тенденцию глобального потепления в арктическом регионе.

Исследование проводилось в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (Соглашение № 169-15-2023-003).

Литература:

1. Gushchina D., Kolennikova M., Dewitte B., Yeh S. W. On the relationship between ENSO diversity and the ENSO atmospheric teleconnection to high-latitudes // International Journal of Climatology. 2021. pp. 1–23.

Анализ воспроизведения Ивановской вспышки смерчей по результатам расчетов с моделью WRF-ARW в сравнении с данными наблюдений

Гостев К.С.^{1,2}, Вазаева Н.В.^{1,3}, Чернокульский^{1,4} А.В.

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁴Институт географии РАН, Москва, Россия

gostev_satino220@mail.ru

Ключевые слова: смерч, WRF-ARW, метеорология, суперячейка, Иваново, воспроизведение, мезомасштабная метеорология

Ивановская вспышка смерчей 9 июня 1984 года является одной из самых разрушительных в истории СССР и России. Известно как минимум о восьми конвективных штормах в этот день, которые привели к формированию по разным данным от 8 до 13 смерчей [1], хотя это число может быть занижено.

В работе представлен анализ данных воспроизведения Ивановской вспышки смерчей с помощью негидростатической мезомасштабной модели WRF-ARW [2], адаптированной для района наблюдений и условий возникновения смерчей, в которой использовалось несколько вложенных сеток, включая области с разрешением 1 и 3 км. Модельные расчеты сравнивались с данными спутниковых и наземных наблюдений.

Отмечено, что модель с разрешением 3 км достаточно достоверно воспроизвела практически все конвективные шторма данного события, включая суперячейки. При этом, чем ближе к центру окклюзии циклона находились ячейки, тем лучше модель воспроизводила их характеристики. На основе полученных материалов было подтверждено наличие, как минимум, трех смерчей в дополнение к определенным ранее по спутниковым данным и данным очевидцев.

Результаты моделирования с разрешением 1 км хотя и были менее успешными для более восточных ячеек (по сравнению с моделированием с разрешением 3 км), более высокое разрешение позволило уточнить ряд характеристик анализируемых штормов. В частности, для ряда из них отмечено слияние суперячеек и эффект Фудзивары. Были обнаружены характерные сигнатуры в местах появления особо крупных смерчей, в том числе с помощью вертикальных профилей абсолютной завихренности и аномалий потенциального вихря. Был проведен анализ процесса окклюдирования тылового нисходящего потока и смерчегенеза в Ивановской суперячейке. Выдвинуто предположение о существовании антициклонального смерча как сопутствующего к основному смерчу, прошедшему через Иваново.

Выявлены определенные ограничения моделирования.

Литература:

1. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: determination of actual tornado tracks with satellite data // Atmospheric Research, 2018, V. 207, P.111–121. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.02.011.
2. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. G. Powers, M. G. Duda, D. M. Barker, and X.-Y. Huang, 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97

Учет процессов электризации при обзёрнении в задаче прогноза грозовой активности для территории Подмоскoвья

Губенко И.М.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия
img0504@yandex.ru

Ключевые слова: *грозы, процессы электризации, схема Халлетта-Моссоп*

Одним из путей повышения качества явного прогноза грозовой активности, основанного на моделях электризации кучево-дождевых облаков, является применение нескольких схем, описывающих заряды гидрометеоров.

В работе представлены оценки качества прогноза гроз для территории Подмоскoвья для лета 2019 г. Приводится сравнение результатов моделирования, полученных с помощью разных версий модели электризации: учитывающая только безындукционный механизм заряжения, безындукционный и индукционный, а также версия с добавлением электризации при обзёрнении Халлетта-Моссоп.

Показано, что добавление схемы заряжения Халлетта Моссоп в облаке позволяет несколько улучшить прогноз гроз, так как это ведет к увеличению объемного заряда между частицами (концентрация их самих растет), а соответственно, позволяет снизить число ложных тревог и предупрежденности отсутствия (в сравнении с версией модели, когда учитывается лишь безындукционная схема или при добавлении к ней индукционной).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-00005, <https://rscf.ru/project/24-77-00005/>.

Современные тенденции циклогенеза и осадков в Атлантико-Европейском секторе

Данилович И.С.¹, Акперов М.Г.²

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

aseid@ifaran.ru

Ключевые слова: циклоны, осадки, типизация циклонов

Проведена типизация циклонов по районам зарождения и их траекториям в Атлантико-Европейском секторе. Наиболее часто территорию Европы пересекают северо-атлантические циклоны, с основным треком в пределах 55-65° с.ш., их повторяемость составляет 16-18 циклонов за сезон. Северо-атлантические циклоны, которые над континентом смещаются южнее, отмечаются 6-7 раз за сезон. Повторяемость южных циклонов варьирует от 7-9 осенью и зимой до 10-11 циклонов в весенне-летний период. Наиболее редкие ныряющие циклоны пересекают территорию Европы 1-2 раза за сезон. Основные тенденции повторяемости циклонов связаны с увеличением северо-атлантических циклонов весной на 2-3 события за сезон.

Наибольшие объемы влаги приносят южные циклоны – в половине случаев суточные суммы осадков достигают 6-7 мм, в 1/3 случаев превышают 10 мм, максимумы в среднем составляют 14 мм. Далее следуют циклоны, пересекающие Атлантику и над континентом, смещающиеся в южном направлении, такие циклоны в половине случаев обеспечивают 5-6 мм в сутки, максимальные суммы в среднем составляют 8-9 мм. Северо-атлантические циклоны, которые смещаются к высоким широтам, обуславливают суточные суммы осадков в пределах 3-5 мм. С ныряющими циклонами связано 1-3 мм в сутки. Наибольшие суммы осадков отмечаются летом при всех типах циклонов.

Тенденции изменения максимальных сумм осадков в период 1979-2019 гг. характеризуются ростом летних максимумов при южных циклонах и зимних максимумов северо-атлантических циклонов с основным треком над континентом. Число дней с циклоническими осадками летом снижается для всех типов циклонов на 2-7 дней. Таким образом, на фоне снижения числа дней с циклоническими осадками отмечается рост максимальных сумм при некоторых типах циклонов.

Количественные оценки роли естественных и антропогенных стоков и источников CO_2 и CH_4 в балансе регионов северного полушария

Денисов С.Н.¹, Елисеев А.В.^{1,2,3}, Мохов И.И.^{1,2,4}

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

denisov@ifaran.ru

Ключевые слова: моделирование климата, потоки парниковых газов, углекислый газ, метан, температурный потенциал

Для оценки способности современных глобальных моделей Земной системы учитывать природный обмен углерода проанализированы данные ансамбля моделей проекта CMIP6 для 21 века. Получены оценки влияния природных и антропогенных потоков углекислого газа и метана с территории России, Китая, Канады и США на возможные изменения глобальной приповерхностной температуры атмосферы в 21 веке при различных сценариях антропогенного воздействия. Вклад в изменения климата оценивался с использованием показателей GWP, GTP и кумулятивного температурного потенциала. Показано, что изменение климатических условий при различных сценариях антропогенных воздействий может сильно влиять на природные потоки парниковых газов и на показатели климатического вклада потоков парниковых газов, особенно на больших временных горизонтах.

Воспроизведение глобальной и региональной атмосферной циркуляции в модели INM-CM6M и оценка изменения циркуляции в будущем климате

Железнова И.В., Гущина Д.Ю.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ijeleznova@gmail.com*

Ключевые слова: *атмосферная циркуляция, центры действия атмосферы, климатическая модель INM-CM6M*

Климатическая модель института вычислительной математики РАН является единственной российской моделью, входящей в международный проект по сравнению климатических моделей CMIP. В рамках развития климатической модели INM-CM необходимо тестирование способности новых ее версий воспроизводить различные аспекты динамики атмосферы и океана.

В настоящем исследовании проводится проверка способности новой версии модели ИВМ РАН INM-CM6M воспроизводить особенности глобальной и региональной атмосферной циркуляции, а также анализируется изменение циркуляции в условиях меняющегося климата по разным сценариям изменения климата XXI века.

В работе были использованы среднемесячные данные реанализа ERA5 за период 1950-2020гг и данные модели INM-CM6M для исторического эксперимента (период 1950-2014гг, 10 членов модельного ансамбля) и экспериментов SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (2015-2100гг, по 3 модельных реализации). Для расчета циркуляции использовались данные о зональном и меридиональном компонентах ветра на изобарических поверхностях 200, 500 и 850 гПа.

Для оценки качества воспроизведения атмосферной циркуляции в модели были рассчитаны зональный и региональный индексы циркуляции Петросянца-Гущиной [1,2]. Показана способность модели INM-CM6M реалистично воспроизводить общую структуру циркуляции по кругу широты и в 23 выбранных центрах действия атмосферы (ЦДА). К концу XXI века модель прогнозирует ослабление интенсивности глобальной зональной циркуляции при сохранении её общей структуры, причем значимой разницы между сценариями не наблюдается. Также прогнозируется ослабление интенсивности циркуляции в ряде центров действия атмосферы (субтропические антициклоны, часть депрессий над океанами).

Исследование проводилось в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (Соглашение № 169-15-2023-003).

Литература:

1. Гущина Д. Ю., Петросянец М. А., Соколичина Е.В. Интегральные характеристики глобального поля ветра. Часть 2. Интенсивность западного и восточного переноса. Метеорология и гидрология, 2002, №5, с. 5 – 16.
2. Петросянец М.А., Гущина Д.Ю. Циркуляция вектора скорости ветра в центрах действия атмосферы как показатель количества осадков и температуры в их пределах. Часть 1. Анализ взаимосвязей на сезонных масштабах. // Метеорология и гидрология, 2006, №5, с. 5-20.

ЭНЮК и изменчивость стратосферного полярного вихря, как факторы формирования предсказуемости погоды на внутрисезонном временном масштабе в Атлантико-Европейском секторе

Зюляева Ю.А.^{1,2}, Собаева Д.^{1,3}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, Россия

²Факультет географии и геоинформационных технологий, Высшая школа экономики, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
yulia@sail.msk.ru

Ключевые слова: стратосферный полярный вихрь, ЭНЮК, ТДК, численное моделирование

Прогностический потенциал стратосферной динамики на субсезонном масштабе обеспечивается временным масштабом и амплитудой динамических возмущений в стратосфере в зимний период. Известно, что после событий экстремального состояния стратосферного полярного вихря (СПВ) происходит перестройка тропосферной динамики в Атлантико-Европейском секторе, которая выражается в отступании шторм-треков на юг после внезапных стратосферных потеплений (ВСП) и смещении шторм-треков на север после событий экстремально сильного вихря. Но данная закономерность не всегда очевидна в отдельно взятом зимнем периоде. Так же известно, что при событиях Эль-Ниньо происходит перестройка крупномасштабной циркуляции умеренных широт как в Северном, так и в Южном полушарии. В работе, на основе анализа данных идеализированных численных экспериментов, было исследовано, проявление динамики шторм-треков в Атлантико-Европейском регионе в годы с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья, и оценено как данные события корректируют механизм стратосферно-тропосферного взаимодействия. В частности, было показано, что нельзя однозначно сказать о более южном положении Атлантического шторм-трека при событиях Эль-Ниньо без учета интенсивности СПВ. Важным результатом работы стало выявление локализации отклика тропосферной динамики на ВСП в зависимости от фазы ЭНЮК. В годы с Эль-Ниньо это западный район Атлантического океана, а в годы с Ла-Нинья – восточный. Данные районы соответствуют областям, где Северо-Атлантический шторм-трек имеет ориентацию на северо-восток. Показано, что реакция шторм-трека происходит только там, где распространение синоптических вихрей имеет северную составляющую. Так же в работе получено, что граничные условия, которые формируются во время Эль-Ниньо позволяют максимизировать прогностический потенциал интенсивности СПВ в зимний период в Северном полушарии относительно тропосферной динамики Атлантико-Европейского региона, когда до 50% изменчивости положения шторм-трека определяется интенсивностью СПВ.

Повторяемость индексов атмосферной циркуляции при формировании аномальных летних сезонов на арх. Шпицберген

Ильющенкова И.А.¹, Коржиков А.Я.¹, Иванов Б.В.^{1,2}

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский университет, Санкт-Петербург,
Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
ilyushenkova@aari.ru

Ключевые слова: Западная Арктика, Шпицберген, синоптические процессы, индексы атмосферной циркуляции, температура воздуха, спектральный анализ

Повышение приземной температуры воздуха (ПТВ) в Северной полярной области происходит более быстрыми темпами по сравнению с другими регионами планеты [1]. Это явление определяется термином – Арктическое усиление [2]. В докладе представлены результаты исследования особенностей формирования летних (июнь – сентябрь) аномальных значений ПТВ в районе арх. Шпицберген и их взаимосвязь с индексами атмосферной циркуляции. В работе [3] отмечается важность исследования ПТВ в летний период, в связи с дальнейшим влиянием летних ПТВ на ледовую обстановку в осенне-зимний период. В работе использованы данные разложения атмосферного давления на уровне моря от 70 ° до 90 ° с.ш. по естественным ортогональным функциям. Рассмотрены атмосферные индексы, представляющие собой первую моду разложения – Арктическое колебание (АО); вторую моду – Арктический диполь (AD); третью моду – Тихоокеанско-Североамериканский индекс (PNA). Для июня статистически значимая корреляционная связь между экстремальными значениями ПТВ и индексами не найдена, в июле она обнаружена с индексом PNA, в августе с индексом AD, в сентябре с индексами АО и AD. Наиболее высокая корреляционная связь экстремальных значений ПТВ обнаружена с индексом AD, теснота связи составила 0,49. Арктический диполь отражает меридиональный перенос воздушных масс. Меридиональная составляющая переноса воздушных масс обуславливает формирование аномальных сезонов. В аномально теплые сезоны воздушные массы поступают в район арх. Шпицберген из Северной Атлантики. При формировании аномально холодных сезонов наблюдаются траектории воздушных масс, распространяющиеся в обратном направлении от севера Гренландии к архипелагу. Спектральный анализ временных рядов индексов циркуляции АО, AD, PNA и аномалий ПТВ в летний сезон позволил выделить наиболее значимые цикличности. В межгодовой изменчивости рассматриваемых индексов и региональных аномалий ПТВ в летний сезон на арх. Шпицберген наиболее характерны колебания с периодами 2–3 года и 5–6 лет.

Литература:

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб: Научное издание; 2022. 124 с.
2. Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылёв Л.П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13 № 3. С. 3–19.
3. Sui C.J., Yu L.J. Trends of summertime extreme temperatures in the Arctic // Adv Polar Sci. 2018. V.29. № 3. p.205-214.

Пространственно-временные особенности современного потепления в Баренцевом и Карском морях

Карандашева Т.К.¹, Иванов Б.В.^{1,2}, Ревина А.Ф.¹, Ильюшенкова И.К.¹

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
b_ivanov@aari.ru

Ключевые слова: Западная Арктика, потепление климата, пространственные и временные особенности

Цель исследования – количественная оценка современных тенденций потепления климата в Баренцевом и Карском морях для периода 1991-2020 гг. (новая норма ВМО). Использованы данные наблюдений приземной температуры воздуха (ПТВ) на российских и норвежских метеорологических станциях (МС), наиболее полно обеспеченных данными регулярных инструментальных наблюдений. Для выбранных МС сформированы временные ряды среднемесячных и среднегодовых значений ПТВ. Для всех МС проведена оценка временных тенденций рядов ПТВ для календарных месяцев и года в целом. Рассчитаны параметры уравнений линейной регрессии, оценена статистическая значимость выявленных линейных трендов. Для всего исследуемого региона линейные тренды среднегодовых значений ПТВ статистически значимы на уровне $p < 0,01$ и положительны. Рост скоростей потепления в исследуемом регионе происходит в направлении с юго-запада на северо-восток. Наибольшая скорость потепления ($> 2^\circ\text{C}/10$ лет) отмечается в северных районах Баренцева и Карского морей, наименьшая ($< 0,75^\circ\text{C}/10$ лет) – в юго-западной незамерзающей части Баренцева моря. Основные характеристики годовых трендов ПТВ определяются тенденциями, наблюдаемыми в холодное время года (октябрь-февраль). В эти месяцы пространственное распределение скоростей потепления имеет четко выраженный «рельеф» с повышением (усиление потепления) в направлении с юго-запада на северо-восток. В теплое время года (май-август) поле скоростей потепления однородно, значения скоростей не превышают $1^\circ\text{C}/10$ лет. В переходные периоды (март-апрель, сентябрь) наблюдается перестройка поля скоростей потепления от ярко выраженного «рельефа» поля скоростей потепления к однородному полю и обратно.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-27-00112 «Современные изменения арктического климата и экстремальные колебания погоды в западном секторе Северного морского пути».

Мониторинг событий Эль-Ниньо (Ла-Нинья) по данным спутниковых наблюдений температурного и радиационного режима в экваториальной части Тихого океана

Кошель А.А., Червяков М.Ю.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г.

Чернышевского, Саратов, Россия

sprhna@gmail.com

Ключевые слова: Эль-Ниньо, радиометр ИКОР-М, альbedo, коротковолновая радиация, поглощённая солнечная радиация

Изучение механизмов формирования и развития событий Эль-Ниньо (ЭН) необходимо для понимания климата планеты и прогнозирования экстремальных погодных явлений. Согласно прогнозам межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в XXI веке частота экстремальных явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья увеличится, что приведет к более засушливым и более влажным периодам в отдельных регионах по всему миру.

Данные радиационного баланса Земли (РБЗ) имеют основополагающее значение для понимания возмущений климатической системы и разработки климатических моделей. В работе используются данные альbedo и поглощенной коротковолновой радиации (ПКР), полученные с помощью радиометров ИКОР-М. Прибор предназначен для измерения отраженной коротковолновой радиации в диапазоне 0,34,0 мкм на верхней границе атмосферы. Радиометры были установлены на борту спутников «Метеор-М» № 1 и № 2, запущенные в 2009 и 2014 годах. В работе описан алгоритм обработки данных, полученных с помощью радиометров ИКОР-М [1]. Также использовались данные о глобальном распределении облачности спектрометрических MODIS, установленных на борту спутников NASA Terra и Aqua.

Проведена оценка изменчивости составляющих РБЗ в районе формирования ЭН с января 2010 по август 2019 года, за этот период наблюдалось 3 события Эль-Ниньо [2]. Оценена взаимосвязь альbedo и температуры поверхности океана (ТПО). Для сопоставления данных использовался архив ТПО NOAA - Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST).

Был изучен годовой ход составляющих РБЗ в коротковолновом диапазоне в регионах Nino, проанализировано пространственно-временное распределение альbedo и облачности в экваториальной части Тихого океана. Установлены закономерности изменения компонентов РБЗ в зависимости от появления ЭН. Выявлены оптимальные регионы для мониторинга событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по данным альbedo.

Литература:

1. Богданов М.Б., Червяков М.Ю., Кошель А.А. Десятилетний ряд глобального распределения альbedo по данным ИСЗ «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 243–251.
2. Червяков М. Ю., А. А. Спирихина Мониторинг событий Эль-Ниньо (Ла-Нинья) в Тихом океане по данным спутниковых радиометров ИКОР-М // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 35-41.

О планетарном потоке энергии и производстве энтропии в области струйного течения и земной поверхностью

Крупчатников В.Н.^{1,2,3}, Гочаков А.В.², Боровко И.В.¹, Градов В.¹, Володин Е.М.⁴

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
vkрупчатnikov@yandex.ru

Ключевые слова: турбулентность, обрушение волн Россби, струйные течения, вихревые потоки тепла, моделирование климата, баланс и производство энтропии

Многие крупномасштабные динамические явления в атмосфере Земли связаны с процессами распространения и обрушения волн Россби. В докладе рассматриваются области противогradientных вихревых потоков тепла в районе субтропического струйного течения в Северном полушарии, связанную с опрокидыванием волн Россби. В этих областях мы наблюдаем меридиональный перенос энергии на северном фланге струйного течения в экваториальном направлении по данным реанализа и данным моделирования с климатической моделью INM-CM4-8, а производство энтропии, за счет горизонтального переноса тепла, становится отрицательным, поскольку тепло переносится против температурного градиента, но это не является нарушением второго закона термодинамики, поскольку основная доля производства энтропии происходит за счет процессов вертикального теплообмена, например конвекция, и других необратимых процессов.

На Земле происходит обмен энергией и энтропией с притоком солнечной энергии и длинноволновым излучением. Эти обмены интегрируются по всей поверхности.

Производство энтропии чувствительно к земному покрову, баланс энтропии больше всего связан с радиацией на поверхности. Количественная оценка термодинамического баланса энтропии и производства энтропии является полезным показателем для оценки взаимодействий системы атмосфера-поверхность. Некоторые оценки производства энтропии поверхностью представлены в данной работе.

В традиционном подходе к исследованию климатической системы основное внимание уделяется динамическим механизмам и физическим процессам, ответственным за преобразование энергии из одной формы в другую, но также важен подход, основанный на анализе баланса энтропии климатической системы и, особенно, производства энтропии.

Работа выполнена в рамках Госзадания: FWNM-2022-0003 и при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 23-17-00273).

Резкое изменение зимнего климата Арктики в 2005 году в Восточном полушарии, связанное с радиационными процессами в атмосфере

Латонин М.М.

*Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена,
Санкт-Петербург, Россия*

mikhail.latonin@niersc.spb.ru

Ключевые слова: *реанализ ERA5, спутниковые наблюдения, климат Арктики, Арктическое усиление, ступенчатая модель, Восточное полушарие, резкое потепление, нисходящая длинноволновая радиация при ясном небе, зимний сезон, температура поверхности Земли*

Потепление климата Арктики носит неоднородный пространственно-временной характер. Целью данного исследования является выявление на основе данных климатического реанализа ERA5 и спутниковых наблюдений пространственно-временной структуры климатических изменений в Арктике за период 1959–2022 гг. Анализ проводился по двум сезонам: зимнему (с осреднением за декабрь–март) и летнему (с осреднением за июнь–сентябрь). Основное внимание уделялось следующим трём параметрам: среднему поверхностному потоку нисходящей длинноволновой радиации при ясном небе, температуре поверхности Земли и приповерхностной температуре воздуха. К временным рядам изучаемых характеристик в каждой точке сетки всей Арктики (67°с.ш.–90°с.ш.) была применена статистическая модель ступенчатых изменений. В зимний сезон между всеми параметрами была обнаружена тесная пространственно-временная взаимосвязь. Был выявлен наиболее частый зимний год ступенчатых изменений в Арктике – 2005 г. При этом именно этот переход из одного состояния климатической системы в другое оказался статистически значимым на значительной территории, расположенной преимущественно в Восточном полушарии. Осреднённые по выделенным районам временные ряды высоко коррелируют между собой, а 2005 год характеризует смену резкого роста величин на их изменчивость без выраженного тренда. Имеющиеся спутниковые наблюдения полностью подтверждают временную структуру ступенчатых изменений исследуемых параметров и в значительной степени подтверждают её пространственную структуру. При этом в летний сезон статистически значимых переходов из одного состояния климатической системы в другое для наиболее частых годов ступенчатых изменений обнаружено не было. Таким образом, в зимний период нисходящий длинноволновой поток радиации при ясном небе в значительной степени формирует термический режим Арктики.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-01046 (<https://rscf.ru/project/23-77-01046/>).

Оценка ветроэнергетического потенциала российской Арктики на основе данных наблюдений и модельных расчетов

Леонова Д.С.¹, Акперов М.Г.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

daleonovaria@gmail.com

Ключевые слова: Арктика, ветроэнергетика, моделирование, реанализ, изменения климата

В последнее время климат Арктики привлекает к себе внимание из-за его чувствительности к глобальному потеплению. Климатические изменения делают этот регион более доступным для экономической деятельности. Однако, учитывая его удаленность, возникает проблема высоких затрат на энергоснабжение и необходимость субсидий. В условиях децентрализованной энергетической системы электроэнергия вырабатывается с помощью дизельных и бензиновых генераторов, что приводит к сложностям с утилизацией отходов от топлива и создает экологические риски. Эти станции также способствуют выбросам парниковых газов. Внедрение возобновляемых источников энергии, таких как ветер, может стать более экономически целесообразным решением для обеспечения энергией удаленных арктических регионов.

В работе получены количественные оценки возможных изменений мощности ветроэнергетического (МВП) потенциала в Арктике в XXI веке с использованием данных модельных расчетов с климатической моделью INM-CM5-0 при различных сценариях изменения климата (SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-5.8). Для расчетов МВП применена процедура коррекции систематической ошибки модельной скорости ветра с помощью метода квантильного преобразования на основе распределения Вейбулла с использованием данных ERA5. Согласно полученным результатам для XXI в. при сценариях SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-5.8 отмечено заметное увеличение МВП над Карским, Восточно-Сибирским и Чукотским морями. Изменения более выражены при сценарии SSP5-5.8 с сильным антропогенным воздействием в XXI веке. Данные изменения достаточно хорошо коррелируют с изменениями концентрации морских льдов в Арктике.

Экстремальные скорости ветра в Атлантическом секторе Арктики: статистика и циркуляционные модели

Ломакин И.Р.^{1,2}, Кислов А.В.¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

ilja.lomakin2@vandex.ru

Ключевые слова: экстремумы ветра, распределение Вейбулла, циклоны, полярные мезоциклоны, «драконы», «черные лебеди»

Экстремальные скорости ветра над Гренландским, Норвежским и Баренцевым морями, а также прилегающей сушей, исследованы с помощью реанализов ERA5 и CARRA. Показано, что функция распределения вероятностей описывается распределением Вейбулла, однако самые большие и самые редкие значения сильно отклоняются от этого закона (по этому признаку их образно называют «драконами»): отличия могут превышать 10 м/с. «Драконы» связаны с циклонами, развивающимися в холодное время года на арктическом фронте, но с такого же рода циклонами связаны и менее мощные экстремумы, подчиняющиеся распределению Вейбулла (называемые «черные лебеди»). Оказалось, что на основе фронтального анализа эти ситуации разделить нельзя. В незначительной части случаев в тех регионах, где наблюдались самые мощные экстремальные ветра, обнаружены полярные мезоциклоны.

Усовершенствование расчета испарения с поверхности суши в модели деятельного слоя суши TerM (ИВМ РАН — МГУ)

Медведев А.И.^{1,2}, Степаненко В.М.^{1,3,4}, Богомолов В.Ю.⁵

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁵Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

alexbear95@yandex.ru

Ключевые слова: испарение, модель деятельного слоя суши, листовой индекс, шероховатость земной поверхности

Модель деятельного слоя суши TerM (ИВМ РАН — МГУ) основана на блоке деятельного слоя суши модели Земной системы INMCM. В докладе будут представлены результаты по оценке качества моделирования региональных потоков испарения в модели TerM на территории севера европейской части России (бассейны рек Северная Двина и Печора, станция FLUXNET Федоровское), а также по усовершенствованию моделирования испарения с помощью модификации параметров и параметризаций модели. В числе предлагаемых модификаций обновление карты земного покрова и данных по листовому индексу, модификация параметризации завядания растительности, параметризаций динамической и термической шероховатости земной поверхности. Выполненные модификации позволили существенно увеличить качество моделирования испарения в экспериментах с предписанным атмосферным воздействием (реанализ ERA5 и данные наблюдений).

Исследование межгодовых вариаций температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации над Восточной Сибирью

Медведева И.В., Ратовский К.Г.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
ivmed@iszf.irk.ru

Ключевые слова: атмосфера, ионосфера, межгодовые вариации, мезопауза, температура, максимум электронной концентрации, атмосферные осцилляции

По данным спектрометрических измерений параметров эмиссии молекулы ОН ((6-2), 834.0 нм, ~87 км) в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8° N, 103.1° E, Торы) и данным вертикального зондирования на иркутском ионозонде DPS-4 (52.3° N, 104.3° E) в 2008-2020 гг. проведено исследование межгодовых вариаций температуры области мезопаузы T_m и максимума электронной концентрации $NmF2$ и их изменчивостей σT_m и $\sigma NmF2$. К анализу привлечены данные об индексах солнечной (F10.7) и геомагнитной (Ap) активности, а также данные об индексах Южной (SOI), Североатлантической (NAO) и Арктической (AO) осцилляций атмосферы. В результате множественного регрессионного анализа обнаружено следующее. Среднегодовые значения $NmF2$ преимущественно контролируются изменениями солнечного потока. Межгодовые вариации $\sigma NmF2$ обусловлены изменениями как солнечной, так и геомагнитной активности. Межгодовые вариации температуры мезопаузы и ее изменчивости слабо коррелируют с изменениями индексов F10.7 и Ap. Включение индексов атмосферных осцилляций в множественный регрессионный анализ привело к значительному увеличению коэффициентов детерминации. Так, для температурной изменчивости, по сравнению с регрессией T_m на F10.7 и Ap, наиболее высоки ее коэффициенты детерминации получены для множественной регрессии на SOI и Ap. Коэффициенты детерминации значительно возрастают: с ~32 до 67% для межсуточной σT_m , с ~7 до 57% для приливной T_m и с ~6 до 36% σT_m с периодами ВГВ. Множественный регрессионный анализ среднегодовой температуры мезопаузы и индексами F10.7 и Ap не выявил их значимой корреляции (коэффициент детерминации 9.1%), тогда как регрессия на индексы AO и F10.7 показала коэффициент детерминации 72%. Полученные результаты могут указывать на влияние нижележащих слоев атмосферы на характеристики верхней атмосферы средних широт в анализируемый временной интервал. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-17-00146, <https://rscf.ru/project/22-17-00146/>.

Анализ частоты молний в четырёх моделях CMIP6

Михайлов Р.П.¹, Гурьянов В.В.¹, Елисеев А.В.^{1,2,3}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

mikhailov.r2001@gmail.com

Ключевые слова: частота молний, CMIP6, LIS/OTD, моделирование климата

Частота молний (ЧМ) - одна из важных климатических переменных. В данной работе проведён анализ ЧМ для четырёх моделей проекта Coupled Models Intercomparison Project, phase 6 (CMIP6). Уже для современного периода (1995-2014 гг.) модели характеризуются заметными различиями для многолетних средних значений ЧМ, межгодового среднеквадратического отклонения частоты молний и температурной чувствительности ЧМ. Средняя многолетняя глобальная частота молний различается в два раза между моделями, и только две из четырех моделей достаточно близки к оценкам по спутниковым данным LIS/OTD (Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector).

К концу XXI века при сценариях антропогенного воздействия на систему в моделях частота молний в целом увеличивается. При этом несмотря на существенные межмодельные различия пространственной структуры этих изменений, можно выделить и особенности, характерные для всех моделей. Эти особенности включают пространственный максимум среднегодового изменения ЧМ над тропическими континентами. Летом Северного полушария частота молний сильно увеличивается над внутренней частью Евразии и над Северной Америкой. В целом, изменения ЧМ от современного периода к концу XXI века больше для моделей с большей климатической чувствительностью и при более высоких антропогенных эмиссиях CO₂ в атмосферу. Коэффициент температурной чувствительности ЧМ β для изменений между современным периодом и концом XXI века положителен на большинстве континентальных территорий с типичными значениями от 10 до 20 %/К для среднегодовой частоты молний и от 20 до 60 %/К летом в средних широтах над континентами Северного полушария. При глобальном и среднегодовом осреднении эта чувствительность составляет от 5 до 17 %/К. Подобный коэффициент чувствительности, но вычисленный для современного периода (1995-2014 гг.) регрессией ЧМ на приземную температуру, в свою очередь, меняет знак между различными регионами. Эти региональные особенности в целом воспроизводятся моделями.

Фазовые соотношения между изменениями глобальной температуры и содержания CO₂ в атмосфере при комбинированном воздействии на Земную систему

Мурышев К.Е.^{1,2}, Елисеев А.В.^{1,2}, Мохов И.И.^{1,2}, Денисов С.Н.², Тимажев А.В.², Климович Г.П.¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kmuryshev@mail.ru

Ключевые слова: Изменения климата, углеродный цикл, причинно-следственные связи, фазовые соотношения

С климатической моделью ИФА РАН поставлены численные эксперименты по оценке изменений климата в 2020-3000 гг. при комбинированном внешнем воздействии на Земную систему, включающем в себя 1) антропогенные эмиссии CO₂ в атмосферу (E) и 2) знакопеременный поток энергии в поверхностный слой океана и деятельный слой суши, соответствующий естественной изменчивости климата (F).

Эмиссии CO₂ (E) задавались в соответствие со сценарием SSP1-2.6, продолженным до 3000 г. и дополненным синусоидальными вариациями с амплитудами {0.1, 0.5, 1.0} ГтС/год и периодом 50 лет, соответствующим среднему значению периода экономических циклов Кондратьева.

Поток энергии F задавался в виде синусоидальной функции с периодом 60 лет, характерным для естественной изменчивости климата, и амплитудами {0.05%, 0.1%, 0.25%, 0.5%} от значения солнечной постоянной 1366.09 Вт/м².

Исследовались фазовые соотношения между изменениями глобальной температуры (T) и содержания в CO₂ атмосфере (q) в скользящем окне шириной 50 лет.

Получено, что изменения T могут как отставать по фазе от изменений q, так и опережать их, в зависимости от положения скользящего окна на оси времени. Так, на протяжении третьего тысячелетия фазовая задержка между изменениями T и q может несколько раз менять знак.

Этот эффект возникает при определенном соотношении между амплитудами E и F, таком что они вносят сопоставимый друг с другом вклад в изменение T. Указанный эффект может быть объяснен на основании аналитических решений, полученных при рассмотрении системы линейных уравнений, в упрощенном виде описывающих динамику Земной системы.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по фазовым соотношениям между коррелируемыми переменными, вообще говоря, нельзя судить о характере причинно-следственной связи между ними без привлечения физических представлений о природе их взаимодействия.

Эмпирическая реконструкция режимов погоды средних широт как метастабильных состояний атмосферы

Мухин Д.Н., Самойлов Р.С.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
mukhin@ipfran.ru

Ключевые слова: режимы погоды, скрытые марковские модели, циркуляция атмосферы, эмпирическое моделирование

Низкочастотная изменчивость атмосферы средних широт характеризуется спорадически возникающими повторяющимися, иногда долгоживущими паттернами циркуляции атмосферы масштаба полушария, называемыми режимами погоды. Идентификация и моделирование режимов погоды, а также понимание их динамических свойств, играют ключевую роль в улучшении точности и дальности внутри- и межсезонного прогноза погодно-климатических аномалий. В последние годы для объяснения режимов была обоснована и развита концепция метастабильных состояний, в соответствии с которой в фазовом пространстве нелинейной динамической системы, лежащей в основе атмосферной циркуляции, присутствуют области залипания фазовой траектории, ассоциируемые с режимами. Из данной концепции следует определение режимов как сообществ состояний, в которых атмосферная система пребывает аномально долго. В данной работе мы развиваем эффективный способ выделения таких сообществ путем построения и анализа оператора эволюции системы в форме скрытой марковской модели (СММ). Показано, что, будучи довольно простой конечномерной моделью с короткой памятью, СММ, тем не менее, служит удобным инструментом для обнаружения метастабильности, а также для определения бассейнов метастабильных состояний. Разработанный метод применен для выделения режимов погоды над Северным полушарием в зимние сезоны по данным геопотенциальных высот тропосферы. Сравниваются режимы, их динамические свойства, а также влияние на погодные аномалии, полученные по данным реанализа и по данным исторических и доиндустриальных экспериментов с моделью земной системы ИВМ РАН. Кроме того, демонстрируются первые результаты реконструкции режимов для различных сезонов, с использованием полугодовой СММ. Исследуется межсезонная предсказуемость режимов на основе построенной модели.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 22-12-00388.

Штормовое волнение и повторяемость циклонов в восточном секторе российской Арктики

Мысленков С.А.^{1,2}, Круглова Е.Е.^{1,3}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия

stasocean@gmail.com

Ключевые слова: ветровые волны, моделирование, арктические моря, шторма, повторяемость циклонов

Работа посвящена исследованию штормового волнения и циклонов в морях восточного сектора российской Арктики. Данные о параметрах ветрового волнения получены на основе модели WAVEWATCH III и подробно описаны в работе [1]. Данные о ветре, циклонах и концентрации морского льда получены из реанализа NCEP/CFSR/CFSv2 за период с 1979 по 2021 г. Для оценки количества случаев штормового волнения применялась методика Peak Over Threshold, более подробно представленная в [2].

Анализ сезонной изменчивости повторяемости и продолжительности случаев штормового волнения показал рост штормовой активности в морях Восточной Арктики. Положительные значимые тренды получены для количества штормов с высотами > 2 метра в летний и осенний период для всех морей Восточной Арктики. Наибольшая величина тренда составляет 2 шторма/ 10 лет и наблюдается в летний и осенний период в Восточно-Сибирском море. Наибольший рост суммарной продолжительности штормов наблюдается осенью в море Лаптевых (6 сут/10 лет) и в Чукотском море (5.6 сут/ 10 лет). Положительные тренды отмечены и для продолжительности безледного периода. Наблюдается увеличение количества циклонов в море Лаптевых (3 циклона/10 лет) и в Восточно-Сибирском море (1 циклон/ 10 лет). Количество штормов и их продолжительность тесно связаны с увеличением продолжительности безледного периода в исследуемых морях. Коэффициент корреляции превышает 0.7. На количество штормов осенью в море Лаптевых и летом в Восточно-Сибирском море существенно влияет и увеличение количества циклонов проходящих над акваторией этих морей. В Чукотском море тренд для циклонов положительный, но не значимый.

Литература:

1. Мысленков С.А. Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2023. — № 1. — С. 87-101.
2. Мысленков С.А., Круглова Е.Е., Багатинский В.А. Повторяемость штормового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2024. — С. 41-55.

Характеристики облачности в Арктике по данным глобальных климатических моделей и спутниковых наблюдений при разной концентрации морского льда

Нарижная А.И.¹, Чернокульский А.В.¹, Мохов И.И.^{1,2}, Тимажев А.В.¹, Семенов В.А.¹

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

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
alex.narizhnaya@ifaran.ru

Ключевые слова: климат Арктики, глобальные климатические модели, спутниковые данные, облачно-радиационный эффект, свойства облаков, атмосферная радиация

Арктика испытывает наиболее быстрые изменения климата на Земле в последние десятилетия. Облака и свойства подстилающей поверхности играют важную роль в формировании теплового баланса этого региона, поскольку они определяют интенсивность коротковолнового и длинноволнового излучения в нижних слоях атмосферы.

В данной работе проведен сравнительный анализ облачно-радиационных характеристик по модельным данным (CMIP6) и спутниковым наблюдениям (CERES). Оценивался облачно-радиационный эффект, Вт м-2 (ОРЭ), для расчета которого использовались данные о коротковолновом и длинноволновом радиационном потоках (КВР и ДВР, соответственно) на поверхности при полном и ясном небе по данным моделей CMIP6 над акваториями высокоширотной Арктики (эксперимент historical). Анализ осуществлялся для холодного и теплого сезонов, а также для различных ледовых условий в зависимости от концентрации морского льда.

В целом, модели демонстрируют гораздо более сильную межгодовую изменчивость (как зимой, так и летом, как для КВР, так и для ДВР, как над открытой водой, так и над сплошным ледовым покровом), чем наблюдения. Наибольшие погрешности обнаружены как в балле облачности, так и в ОРЭ в зимний период над полностью покрытой льдом поверхностью (сплоченность льда >95%). Наилучшее согласие между данными моделей и наблюдениями получено для длинноволнового ОРЭ над открытой водой (сплоченность льда < 5%) в летний сезон, с разбросом ~ 20 Вт м-2.

Показано, что в моделях облака способствуют охлаждению нижней атмосферы Арктики летом и потеплению зимой: суммарный ОРЭ по данным наблюдений зимой составил 24 Вт м-2 (+35...50 Вт м-2 по данным моделирования) и 13 Вт м-2 (-30...-45 Вт м-2 по данным моделирования) летом. Также, были выделены «лучшие» модели, которые согласуются с данными спутниковых наблюдений в оценке пространственного распределения долгопериодной и межгодовой изменчивости средних характеристик облачности в Арктике.

Статистические модели и прогнозы временной изменчивости характеристик поля ветра и содержания парниковых газов по данным дистанционных измерений

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В.

Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия
nerushev@rpatyphoon.ru

Ключевые слова: статистические модели, поле ветра, высотные струйные течения, турбулентность в ясном небе, парниковые газы, прогнозы, спутниковая информация

Поле ветра в свободной атмосфере и содержание парниковых газов относятся к числу важнейших климатических характеристик и климатообразующих факторов, требующих систематического контроля, анализа и прогнозирования. В докладе рассмотрены вопросы анализа и прогнозирования указанных характеристик на основе данных дистанционных измерений.

Представлены статистические модели временной изменчивости характеристик поля ветра (параметров высотных струйных течений, площадей зон турбулентности в ясном небе, модуля скорости ветра) в свободной атмосфере по данным измерений европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения и приземной концентрации парниковых газов на станции Обнинск по данным спектроскопических измерений.

Показано, что модели множественной линейной регрессии, в которых в качестве предикторов используются площадь арктического морского льда, температурные характеристики атмосферы, различные индексы крупномасштабных процессов, описывают до 50-70% изменчивости характеристик поля ветра в свободной атмосфере.

Построена статистическая модель, включающая тренд и сумму гармонических составляющих для временного ряда приземной концентрации CO₂ на станции Обнинск и выполнены прогностические расчеты на 2024-2026 гг. Проведен анализ и сравнение с аналогичными статистическими моделями для станций Мауна-Лоа (о. Гавайи, США) и Барроу (Аляска, США). Обсуждаются общие черты и различия.

С использованием модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего – ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) – проанализированы временные ряды характеристик поля ветра над всей видимой со спутников областью Северного полушария, а также отдельными её частями – Атлантикой, Европой и Евразией. Представлены результаты прогностических расчетов на 2-4 года временной изменчивости среднемесячных значений характеристик поля ветра.

Анализ влияния изменения границы морского льда на полярные циклоны по данным модели ICON

Никитин М.А.¹, Ревокатова А.Ю.^{1,2}, Ломакин И.Р.^{1,3}

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

²Институт глобального климата и экологии имени Ю.А. Изразля, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Arhin@yandex.ru

Ключевые слова: полярные циклоны, мезомасштабные атмосферные процессы, численный прогноз погоды, морской ледяной покров

Полярные циклоны являются мезомасштабными барическими образованиями, способными представлять угрозу хозяйственной деятельности в арктических регионах. Они характеризуются скоростями ветра выше 15 м/с, малым временем жизни (порядка 1-2 суток) и высокой скоростью перемещения, а их прогнозирование сопряжено со сложностями.

В данной работе проведено численное моделирование нескольких полярных циклонов, наблюдавшихся в 2021-2024 годах в районе Норвежского и Баренцева морей, с помощью модели ICON для ограниченной территории с шагом сетки 2 км. Показано, что модель способна воспроизводить полярные циклоны, при этом заблаговременность успешного прогноза в большинстве случаев составляет от 12 до 24 часов.

Для изучения влияния подстилающей поверхности на прохождение полярных циклонов проведено несколько экспериментов с изменением температуры воды и характеристик морского льда. Показано, что наращивание ледяного покрова приводит к затуханию полярных циклонов, в то время как освобождение моря ото льда зачастую сказывается на них довольно слабо. Отсутствие ледяного покрова вкупе с повышением температуры воды до 5°C приводит к интенсификации полярных циклонов. При этом влияние изменения подстилающей поверхности на полярные циклоны существенно зависит от механизма их зарождения. Например, полярный циклон от 17-18 марта 2022 года, который был связан со струйным течением на 200 гПа, сохранялся даже при полном покрытии траектории его движения льдом, пусть и в крайне ослабленном виде.

Байесовы оценки площади распространения морского льда в Арктике в 21 веке по данным моделей CMIP6 и спутниковых наблюдений

Парфенова М.Р.¹, Елисеев А.В.^{1,2,3}, Мохов И.И.^{1,2}

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

parfenova@ifaran.ru

Ключевые слова: моделирование, морской лед, байесово осреднение, CMIP6

Проведен анализ площади распространения S_i морского ледяного покрова в Арктике в 21 веке на основе ежемесячных данных моделей ансамбля CMIP6 (Coupled Models Intercomparison project, phase 6) при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Для каждой модели было оценено качество воспроизведения основных характеристик изменений в сравнении с данными спутниковых наблюдений площади распространения морского льда с 1980 по 2015 год (https://nsidc.org/data/seaice_index). Совместный учет качества воспроизведения моделями характеристик климата на всех временных масштабах (многолетнее среднее, линейный тренд, межгодовые вариации) в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение. Получено, что при сценарии SSP2-4.5 ансамблевое среднее S_i в сентябре немного превышает «взвешенное» и составляют порядка 1 млн кв км к концу 21 века, а межмодельное стандартное отклонение сократилось на 30% относительно невзвешенного (рис. 1а). При сценарии SSP5-8.5 ансамблевое среднее протяженности морского льда в сентябре также немного превышает соответствующие оценки, полученные при помощи метода байесова усреднения с полным таянием ледяного покрова примерно к 2065 году; межмодельное стандартное отклонение при этом сократилось более, чем на 50% относительно невзвешенного (рис. 1б).

Современные тенденции изменения основных климатических показателей на территории России

Переведенцев Ю.П., Мирсаева Н.А., Гурьянов В.В., Николаев А.А.
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
ypereved@kpfu.ru

Ключевые слова: климатические показатели, температура воздуха, облачность, радиация, корреляция, тенденции

В условиях современного потепления климата представляет интерес комплексная оценка пространственно-временной изменчивости основных метеорологических полей (температуры воздуха, атмосферного давления, суммарной радиации, общей облачности, атмосферных осадков и др.) на территории России за последние десятилетия (1980-2023 гг.).

В качестве исходных данных использовались данные реанализа ERA5, ВНИИГМИ-МЦД, индексы атмосферной циркуляции, которые подвергались статистической обработке и анализу. Дополнительно рассчитывались индексы экстремальности и условия теплового комфорта (индекс UTCI).

В результате были построены карты полей средних многолетних значений и характеристик их временной изменчивости для вышеперечисленных метеорологических величин для всей территории России.

Установлено, что во все сезоны года на территории России происходит потепление климата (исключение юг Западной Сибири зимой, где $KНЛТ < 0$) со скоростью 0,4-0,8°C/10 лет в зависимости от сезона и территории. Одновременно наблюдается рост давления со скоростью от 0,2 до 0,8 гПа/10 лет в зависимости от сезона. Выявлены регионы с ослаблением приходящей суммарной радиации в зимний период и ее ростом в летний.

Анализ корреляционных связей между метеорологическими полями показал, что зимой повсеместно коэффициенты корреляции между температурой воздуха и общей облачностью положительны ($r \approx 0,45$ на юге Сибири), что свидетельствует об утепляющей роли облаков. Летом, наоборот, $r < 0$ (в центре ЕЧР $r = -0,55$). Рассмотрение корреляционных связей между температурой воздуха и индексами атмосферной циркуляции показало, что наиболее тесные связи возникают с Северо-Атлантическим колебанием (NAO), Арктической осцилляцией (AO), осцилляциями Восточная Атлантика – Западная Россия (EAWR) и Скандинавской (SCAND).

Полученные результаты свидетельствуют о наличии взаимосвязей между метеорологическими полями и определяющей роли барико-циркуляционного режима в их пространственно-временной изменчивости.

Роль нисходящей длинноволновой радиации в прогнозе температуры воздуха в условиях снежного покрова

Пискунова Д.А.^{1,2}, Чубарова Н.Е.^{1,2}, Шатунова М.В.², Шувалова Ю.О.²

¹Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия
daria.a.piskunova@gmail.com

Ключевые слова: температура воздуха, длинноволновая радиация, модель ICON, облачность, снежный покров

Точность прогноза температуры в моделях численного прогноза погоды в значительной степени зависит от точности воспроизведения радиационного баланса. В зимний период для Московского региона длинноволновый баланс преобладает по модулю над коротковолновым [1], и таким образом во многом определяет температуру. Наибольший интерес при этом представляет величина нисходящей длинноволновой радиации, которая зависит как от профиля температуры и влажности воздуха, так и от водности облаков. В данной работе анализируется точность воспроизведения температуры воздуха на высоте 2 м в негидростатической икосаэдрической модели численного прогноза погоды и климата ICON [2] с шагом сетки 1 км для двух случаев адвекции теплого воздуха в облачных условиях в декабре 2023 г., когда по данным наземных измерений комплекса RAD-MSU(BSRN) [1] наблюдались положительные значения длинноволнового баланса. Такие случаи довольно редки, однако, они представляют большой интерес для изучения погоды и климата в высоких широтах [3]. По результатам экспериментов для обоих случаев было выявлено занижение в модели величины нисходящей длинноволновой радиации, что повлияло и на занижение длинноволнового баланса. В результате отмечалось занижение значений температуры в модели относительно данных измерений Метеорологической Обсерватории МГУ. Причины этого занижения обсуждаются в работе. Были также проанализированы пространственные особенности распределения нисходящей длинноволновой радиации и температуры воздуха и различия между модельными расчетами и измерениями приземной температуры воздуха для всего Центрального Федерального Округа (ЦФО).

Численные эксперименты выполнены в рамках научно-исследовательской работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Верификация результатов по данным комплекса RAD-MSU (BSRN) выполнена при поддержке Центра Коллективного Пользования МГУ (№ 460191494) и Государственной программы № 121051400081-7.

Литература:

1. 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 – Vol. 15 – № 2 – P. 1–19.
2. Prill F. et al, Working with the ICON Model. // Deutscher Wetterdienst, Offenbach. – 2024. – 282 p.
3. Tjernström M. et al. Warm-air advection, air mass transformation and fog causes rapid ice melt // Geophys. Res. Lett – 2015 – Vol. 42 – № 13 – P. 5594–5602.

Представление неопределенности палеорекострукции климата в последнем ледовом цикле в виде окрашенного шума при моделировании динамики ледовых щитов Северного полушария

Плосков А.Н.¹, Елисеев А.В.^{1,2}, Мохов И.И.^{1,2}

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

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
aploskov@ifaran.ru

Ключевые слова: изменение климата, модель ледовых щитов, ледовые щиты, ледовые циклы плейстоцена, неопределённость палеорекострукций, последний ледниковый максимум, MIS3

С двумерной моделью ИФА РАН динамики ледовых щитов и с соответствующей концептуальной моделью были проведены численные эксперименты по моделированию последнего ледникового цикла (128 тыс лет) с учетом неопределенности климатических палеорекострукций. Неопределенность при этом была представлена в виде возмущений температуры, заданных в виде окрашенного (соответствующего автокорреляции от 200 до 1000 лет) шума разной амплитуды. В модели ИФА РАН наибольшая чувствительность результатов моделирования к таким возмущениям проявляется в период MIS3 (50-60 тыс лет назад), когда при выполнении ряда условий в модели развивается межледниковье. В экспериментах с концептуальной моделью наибольшая чувствительность также характерна для периода MIS3. Принципиальным для развития такого межледниковья является достаточно высокая температура подошвы ледового щита, необходимая для интенсификации скольжения ледника по тектонической плите и его таяния. При более низкой температуре подошвы щита, наоборот, резко интенсифицируется рост ледников. Такая чувствительность проявляется сильнее при меньшей площади ледовых щитов. Полученные результаты в целом согласуются с полученными ранее [Плосков и др., 2023].

Литература:

1. Плосков А.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Ансамблевое моделирование динамики ледовых щитов в последнем ледниковом цикле // Доклады Академии наук. 2023, Т. 510(1), стр. 99-10

Об адиабатических источниках/стоках тепла, действующих при формировании внезапных стратосферных потеплений в столбе сжимаемой атмосферы

Радионов А.А.

Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия
aar200772@mail.ru

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, аналитическая модель, механизм формирования, сжимаемая атмосфера, аэродинамика

Изложено теоретическое описание механизма возникновения источников/стоков тепла в атмосфере, основанное на упрощенном аналитическом решении задачи о равновесии неподвижного столба сжимаемой атмосферы. Показано, что формирование планетарной волны и внезапного стратосферного потепления может объясняться изменениями профиля адиабаты на высотах стратосферы, которая обусловлена изменениями двух граничных условий на поверхности Земли. Наибольшее влияние на сжимаемую адиабату оказывает градиент температуры вблизи поверхности. Изменение граничных условий на поверхности (например, при установлении в тропосфере антициклонической циркуляции и/или при весеннем нагреве и просыхании поверхности) приводит к существенному изменению профиля адиабаты на всех высотах. В уравнении теплопроводности изменения адиабаты во времени являются источником/стоком тепла.

Анализируется аналитическое решение нелинейного уравнения, которое удовлетворяет двум условиям равновесия: гипсометрическому уравнению [1] и условию из уравнения неразрывности. После действия оператором дивергенции на уравнение движения получается уравнение для дивергенции скорости, в которое подставляется значение дивергенции, выраженное из уравнения неразрывности, в результате получается нелинейное уравнение в частных производных, которое для неподвижного столба атмосферы имеет вид [2]:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^2 = \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + g \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right),$$

где t - время, μ - вязкость воздуха. Турбулентность принимается постоянной, общий случай обсуждается в [Радионов]. С уравнением теплопроводности и уравнением состояния это уравнение описывает равновесное состояние атмосферы, которое является нестационарным и пульсирующим (влияние нелинейных слагаемых) во времени.

Литература:

1. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. -М.: Мир, 1980, 551 с.
2. Радионов А. А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 3: Нестационарные решения. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 1. С. 112–119. doi: 10.18522/1026-2237-2023-1-112-119

Система краткосрочного численного прогноза погоды Гидрометцентра России на основе российских глобальной и региональных конфигураций бесшовной негидростатической модели нового поколения ICON

Ривин Г.С.^{1,2}, Астахова Е.Д.¹, Розинкина И.А.^{1,2}, Блинов Д.В.¹, Копейкин В.В.¹, Бундель А.Ю.¹,
Кирсанов А.А.¹, Чубарова Н.Е.^{1,2}, Шатунова М.В.¹, Алферов Ю.В.¹, Коспанов А.А.^{1,2}, Никитин М.А.¹,
Полухов А.А.^{1,2}, Ревокатова А.П.¹, Шувалова Ю.О.¹

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

gdaly.rivin@mail.ru

Ключевые слова: краткосрочный численный прогноз погоды, негидростатическая бесшовная модель, конфигурация модели, сетка, шаг сетки, вложенная сетка

Главной тенденцией развития современного численного прогноза погоды (ЧПП) является негидростатическое бесшовное высокоразрешающее суперкомпьютерное моделирование с привлечением машинного обучения. Страны-члены консорциума COSMO (Росгидромет в нём с 2009 г) используют (<https://www.cosmo-model.org>) бесшовную негидростатическую модель ICON (ICOSahedral Nonhydrostatic). В январе 2024 г код ICON (<https://www.icon-model.org/>) стал свободно распространяемым для ЧПП и моделирования климата. По оценкам Ведущего центра ВМО верификации детерминированных прогнозов (<https://wmo.cdnav.ecmwf.int/>) модель ICON уже в группе лучших в мире.

Используя имеющуюся информационную инфраструктуру, в Гидрометцентре России разработаны российские конфигурации модели нового поколения ICON: глобальная ICON-Ru13/6N29 (120 слоев до высоты 75 км, 8 слоев в почве, шаг сетки 13 км с вложенной сеткой на 74 уровнях до 23 км с шагом 6,5 км для внетропической области севернее 29,5 N); региональные ILAM-Ru2 (ICON - Limited Area Mode) с шагом сетки 2 км и для исследований ILAM-Ru1. Для ILAM-Ru2 и ILAM-Ru1 выполнены работы по развитию радиационного блока, моделированию полярных мезоциклонов, усвоению данных и др.

Производственные испытания 2023-2024 гг (<https://method.meteorf.ru/>, пункты «Оценки прогнозов» и «Решения ЦМКП») системы COSMO-Ru с ICON-Ru13/6N29 показали высокую эффективность счета (прогноз на 5 суток длится 55 мин. на 5800 ядрах) и самую высокую успешность среди используемых в Гидрометцентре России систем ЧПП, включая COSMO-Ru6ENa (шаг 6,6 км).

Для глобального ICON-Ru и регионального ILAM-Ru режимов модели ICON планируется совершенствование блоков кода ICON, подготовка и проведение производственных испытаний ILAM-Ru2, разработка ЧПП с подключенной моделью океана на будущих суперкомпьютерах Росгидромета, что открывает совершенно новые перспективы.

Исследование проведено в рамках Научно-исследовательских работ Росгидромета АААА-А20-120021490079-3, АААА-А20-120021890120-8 и АААА-А20-120021490060-1.

Резервы повышения качества системы краткосрочного численного прогноза COSMO-Ru и эффективности интерпретации продукции высокого разрешения

Розинкина И.А.^{1,2}, Ривин Г.С.^{1,2}, Блинов Д.В.¹, Астахова Е.Д.¹, Татаринovich Е.В.,¹ Бундель А.Ю.¹, Кирсанов А.А.¹, Варенцов М.И.^{1,2}, Самсонов Т.Е.^{1,2}, Хлестова Ю.О.¹, Никитин А.Е.¹, Гоморев И.А.¹, Волков И.О.¹

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

inna.rozinkina@mail.ru

Ключевые слова: численный прогноз погоды, негидростатическая модель атмосферы, COSMO-Ru, конвективная неустойчивость, подстилающая поверхность суши, оценки прогнозов погоды, апскейлинг

В Гидрометцентре России функционирует Система COSMO-Ru краткосрочного численного прогноза погоды (ЧПП) на базе конфигураций негидростатической модели COSMO на сетках с шагами от 6.6 км для Северной Евразии до конвекция - разрешающих, 2.2 км для Европейской части России и республики Беларусь, 1 км для регионов Москвы и Сочи и 500 м (исследовательская) для Московского региона. Возрастающая надежность результатов сделала их одной из основ принятия решений прогнозистами Росгидромета.

Многолетнее развитие COSMO-Ru выявило принципиально трудные ситуации, иногда появляющиеся с первых часов ЧПП. В ближайшее время в Гидрометцентре России планируется переход на конфигурации ICON-Ru (на базе модели нового поколения), полученный опыт является крайне важным.

Причины снижения предсказуемости погодных явлений можно разделить на 2 класса: (1) в силу недостатков техник моделирования и (2) в силу действия стохастических факторов при конвективной неустойчивости и осадкообразовании.

Наиболее эффективными резервами уменьшения влияния факторов 1 класса – применение конвекция- разрешающих сеток, включение в технологию ЧПП усвоения информации ДМРЛ, развитие моделирования процессов на суше – в первую очередь – городских ландшафтов, 3-х мерных лесных массивов, начального задания характеристик снежного покрова. Часть из них уже реализована на базе COSMO-Ru, в докладе показаны эффекты.

Для ситуаций 2-го класса наиболее ощутима проблема локализации. Даже при уменьшении шагов с 1 км до 500 м, при значимом уточнении структуры зон конвективных явлений и их размеров, прогнозы положения «очагов» оказались проблематичными. Для преодоления этих проблем эффективно использование подходов апскейлинга (например, при интерпретации карт индексов угроз ряда опасных явлений, включая смерчопасность), вероятностного прогноза, окрестных и объектно-ориентированных методов верификации.

Исследование проведено в рамках НИР Росгидромета AAAA-A20-120021490079-3 и AAAA-A20-120021890120-8.

Пространственно-временная эволюция арктического морского льда в 21 веке согласно данным наблюдений и моделей CMIP6

Романенко В.А.^{1,2}, Семенов В.А.^{1,3}

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

³Институт географии РАН, Москва, Россия

romanenko.victor.geo@mail.ru

Ключевые слова: площадь морского льда, CMIP6, DCPР, диполь давления

Изменения в площади морского льда в Арктике изучены с использованием модельных ансамблей CMIP6 и DCPР, а также данных реанализа ERA5 за период 1980-2030 годов. Среднеансамблевая площадь морского льда воспроизводит близкий к линейному отрицательный тренд за период 1980-2030 годов и не демонстрирует ускоренное таяние в начале 20-го века. Модели DCPР показывают значительно лучшее соответствие с данными наблюдений, включая воспроизведение ускорения таяния льда в марте в начале 20-го века.

В работе также проанализирована рекордно низкая площадь морского льда в сентябре 2012 года, наряду с аналогичными минимумами в климатических моделях за тот же период. Обнаружено, что как наблюдаемые, так и моделируемые минимумы морского льда связаны с определенной атмосферной циркуляцией в предшествующем августе – диполем давления с циклоном над Северным Ледовитым океаном и антициклоном над северной частью Тихого океана. Предполагается, что такая циркуляция способствовала ускоренному таянию морского льда как динамически, так и термодинамически.

Литература:

1. <https://data.ceda.ac.uk/badc/cmip6/data/>
2. <https://www.copernicus.eu/en>

Турбулентный поток тепла северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 г.г.

Рубчenea А.В.¹, Попова В.Г.², Иванов Б.В.^{2,3}

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Арктический и Антарктический научно-исследовательский университет, Санкт-Петербург,
Россия

pp6077@mail.ru

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, ледовитость, сплоченность, турбулентный поток

Исследуемый район – сектора акватории СЛО между Северным полюсом, Гренландией, Шпицбергенем и ЗФИ. Именно здесь наблюдаются максимальные площади, занятые многолетними льдами в течение всего года. Рассматривается связь турбулентных потоков и сплоченности льда.

В летний период года поток направлен от поверхности в атмосферу. Зимой поток с открытых участков воды направлен из океана в атмосферу. Рассчитывался по:

$$H = \rho c_p \text{Stu}(T_0 - T) \quad (1)$$

При осреднении за длительный период условие равенства температуры воздуха температуре поверхности льда приемлемо, турбулентные потоки над поверхностью льда в зимний период принимаются равными нулю. В летний период температура поверхности снежно-ледяного покрова близка к нулю градусов, температура поверхности воды в разводьях также близка к нулю градусов. Температурные контрасты поверхности льда и участков открытой воды практически отсутствуют и для наших общих оценок в летний период температура поверхности принималась равной нулю градусов и учет сплоченности, фактически, терял смысл. Данный подход можно рассматривать как первое приближение к изучению климатологии турбулентного обмена в малоизученном районе Арктики.

За исследуемый период по значениям сплоченности наблюдается значительное сокращение. Расчет потоков турбулентного тепла производился для зимнего (октябрь-май) и летнего (июнь-сентябрь) периодов. Осреднённый по площади турбулентный поток из океана в атмосферу в зимний период рассчитывался по:

$$H = (H_{\text{л}} * (10 - N) + H_{\text{ice}}) / 10 \quad (2)$$

при отсутствии турбулентного теплообмена над поверхностью льда $H_{\text{ice}} = 0$ (2) принимает вид:

$$H = (H_{\text{л}} * (10 - N)) / 10 \quad (2a)$$

Поток тепла из океана в атмосферу имеет тенденцию к увеличению. Т.о. только лишь сокращение сплоченности (или увеличение пространств чистой воды) за исследуемый период может являться причиной, увеличения теплоотдачи в атмосферу в зимний период года и формирования полученной положительной тенденции теплоотдачи из океана в атмосферу в климатическом масштабе.

Литература:

1. Махшта А.П., Тепловой баланс арктических льдов в зимний период // Гидрометеоздат, 1984
2. Миронов Е.У. и др. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики // Рос. Арктика. 2020. №10
3. Репина И.А. и др. Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летнее-осенний период / И.А. Репина, А.Ю. Артамонов, М.И. Варенцов, Е.М. Хавина // Рос. Арктика. 2019. №7

Применение рекуррентных нейронных сетей для анализа динамики атмосферных режимов средних широт

Сафонов С.Е., Гаврилов А.С., Мухин Д.Н.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
s.safonov@ipfran.ru

Ключевые слова: динамика атмосферы, рекуррентные нейронные сети, моделирование климатических режимов

Метастабильные режимы циркуляции характеризуют сложную многомасштабную динамику атмосферы средних широт и могут сохраняться на протяжении нескольких недель. Идентификация, моделирование и прогнозирование этих режимов представляют актуальные научные задачи, решение которых позволит значительно улучшить межсезонный прогноз погодных аномалий над обширными территориями.

В докладе представлена новая стохастическая модель, основанная на рекуррентных нейронных сетях, для симуляции циркуляции атмосферы в средних и полярных широтах с акцентом на детектировании и прогнозировании режимов. Преимущество таких моделей заключается в их способности эффективно моделировать эволюцию сложных нелинейных динамических систем с памятью, таких как атмосфера, без значительного увеличения числа параметров при увеличении длины памяти, что предотвращает переобучение при работе с данными ограниченной протяженности. Это особенно важно для анализа атмосферы с широким спектром временных масштабов.

Модель связывает низкоразмерное пространство динамических переменных - главных компонент наблюдаемой динамики - с факторами, специально сконструированными для выявления режимов циркуляции. Для построения этих факторов применялся метод нелинейного анализа главных компонент, который позволяет выделить несколько переменных, в пространстве которых обеспечивается хорошее разделение групп схожих состояний атмосферы. Использование рекуррентной нейронной сети позволяет одновременно прогнозировать эволюцию динамических переменных и отображать их в факторное пространство, что способствует эффективной идентификации и предсказанию атмосферных режимов. В докладе будут представлены результаты применения предложенного метода к данным геопотенциальных высот уровня 500 гПа в зимние сезоны в Северном полушарии, включая данные трехслойной квазигеострофической модели атмосферы и реанализа NCEP/NCAR с 1950 года по настоящее время.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект FFUF-2022-0008).

Эмпирическое моделирование динамики колебания Эль-ниньо: структурная устойчивость и бифуркации стохастических моделей

Селезнев А.Ф., Гаврилов А.С., Мухин Д.Н., Лоскутов Е.М., Фейгин А.М.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
aseleznev@ipfran.ru

Ключевые слова: динамические системы, стохастические модели, структурная устойчивость, бифуркации, Эль-Ниньо

Построение модели динамической системы (ДС) напрямую по данным наблюдений (эмпирическое моделирование) представляет собой одну из задач машинного обучения, для решения которой часто используется метод максимального правдоподобия (в более общей форме - метод оценки апостериорного максимума), который при достаточно общих предположениях позволяет получить состоятельную оценку неизвестных параметров модели по имеющейся выборке данных [1]. Однако отыскание параметров модели ДС на основе точечных оценок не позволяет исследовать качественные изменения динамики при вариациях параметров и связанные с этим важнейшие вопросы о структурной устойчивости (грубости) и бифуркациях. В данной работе для построения стохастической модели ДС по данным наблюдений применяется т.н. байесов статистический подход, при котором неизвестные параметры модели фактически не оцениваются, а трактуются как случайные величины, соответствующие апостериорному распределению вероятностей, получаемому на основе наблюдаемых данных. Сложности практической реализации данного подхода обусловлены необходимостью использования сложных численных методов для анализа апостериорного распределения в случае почти любой отличной от линейной параметризации модели [2]. В данной работе предлагается альтернативный метод анализа апостериорного распределения, основанный аппроксимации его в окрестности максимума нормальным распределением. Развиваемый подход применяется для реконструкции динамики и анализа структурной устойчивости колебания Эль-Ниньо по временным рядам, сгенерированным концептуальной моделью, и по реальным данным наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 23-62-10043.

Литература:

1. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006.
2. Loskutov E. M., Molkov Ya I., Mukhin D. N., Feigin A. M. Markov chain Monte Carlo method in Bayesian reconstruction of dynamical systems from noisy chaotic jun. time series // Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. 2008. Vol. 77, no. 6. P. 066214.

Изменения климата западной части российской Арктики в 1940-2099 годы по наблюдениям, реанализам и моделям CMIP6

Серых И.В.¹, Толстиков А.В.²

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

²Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

iserykh@gmail.com

Ключевые слова: изменение климата, Арктика, приповерхностная температура воздуха, Баренцево море, Белое море, Карское море, модели CMIP6

Исследованы климатические изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в регионе западной части российской Арктики (60–80° с. ш., 30–90° в. д.). Для анализа произошедших за 1940–2023 гг. изменений ПТВ использованы данные метеостанций, реанализов MERRA-2 и ERA5, а также результаты эксперимента Historical моделей CMIP6. Будущие изменения ПТВ до конца XXI в. рассмотрены по результатам экспериментов SSP моделей CMIP6. Показан рост средней ПТВ исследуемого региона на 2–4°C с середины 1970-х по 2023 г. Причем этот рост ПТВ заметнее всего проявился в Белом и Карском морях, а также на севере и востоке Баренцева моря.

Модели CMIP6 на основе различных сценариев SSP выбросов парниковых газов дают заметно различающиеся прогнозы повышения ПТВ исследуемого региона до конца XXI в. Так, в зависимости от сценария SSP увеличение ПТВ западной части российской Арктики к концу XXI в. может составить от 2–4°C до 6–10°C с более сильным ростом ПТВ на севере исследуемого региона. При этом в малой зависимости от будущего сценария SSP модели CMIP6 прогнозируют, что в ближайшие 30 лет средняя ПТВ западной части российской Арктики вырастет приблизительно на 2–3°C, причем на севере исследуемого региона ее рост может составить более 3°C, а на юге — около 2°C.

В [1] на основе анализа данных MERRA-2 выдвинута гипотеза, что рост ПТВ западной части российской Арктики произошел из-за глобального потепления, ставшего триггером для запуска трех положительных обратных связей, действующих в исследуемом регионе и усиливающих рост ПТВ: альбедная обратная связь, обратная связь с циркуляцией атмосферы и обратная связь с влажностью воздуха. Из полученных в [2] результатов и наличия положительных обратных связей можно заключить, что продолжение роста ПТВ западной части российской Арктики в следующие несколько десятилетий имеет высокую степень вероятности.

Литература:

1. Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. – Ч. 2: Температура почвы, снег, влажность // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 4. С. 352–369.
2. Серых И.В., Толстиков А.В. Климатические изменения температуры воздуха западной части российской Арктики в 1940–2099 гг. по данным ERA5 и моделям CMIP6 // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14, № 3. В печати.

Влияние локализации аномалий ТПО в тропическом Тихом океане на крупномасштабную структуру планетарных волн и тропосферно-стратосферную динамику в идеализированных модельных экспериментах

Собаева Д.^{1,2}, Зюляева Ю.А.^{1,3}

¹Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

³Факультет географии и геоинформационных технологий, Высшая школа экономики, Москва,
Россия

sobaeva.da@phystech.edu

Ключевые слова: стратосферный полярный вихрь, ЭНЮК, ТДК, численное моделирование

В настоящее время период детерминистического прогноза стратосферной динамики составляет не более 2 недель. Однако крупномасштабные аномалии температуры поверхности океана (аТПО), такие как Эль-Ниньо – Южное колебание, позволяют расширить период прогноза на более длительный срок.

Конец 20 века характеризуется увеличением количества наблюдаемых событий Эль-Ниньо неканонического типа – Эль-Ниньо Модоки (ЭНМ). В отличие от канонического Эль-Ниньо (КЭН), аТПО которого определяются в регионе Ниньо-3, положительные аТПО ЭНМ наблюдаются в центре тропического Тихого океана (Ниньо-4). Целью данной работы было определить различия во влиянии локализации положительных аТПО тропического Тихого океана на тропосферно-стратосферное взаимодействие по данным модельных экспериментов на платформе Isca.

Показано, что при аТПО, соответствующих по локализации ЭНМ, наблюдается более интенсивное и структурированное распространение волны Россби из тропиков в умеренные и полярные широты, по сравнению с условиями КЭН. В следствие этого, в эксперименте ЭНМ наблюдается ослабление стратосферного полярного вихря и увеличение количества внезапных стратосферных потеплений, по сравнению с экспериментом КЭН. При этом, при локализации аТПО, соответствующей КЭН, на уровне 200 гПа в зимний период формируется одна волновая структура, распространяющаяся с северо-запада на юго-восток, в то время как при локализации аТПО, соответствующей ЭНМ, наблюдается две зонально ориентированные волновые структуры вдоль 20° и 40° с.ш.

Также показано, что Эль-Ниньо формирует особую циркуляцию в тропосфере: на уровне 200 гПа в тропиках наблюдается зона дивергенции, а в умеренных широтах в районе Алеутского минимума – формирование циклона. Эти две структуры ограничивают струйное течение (СТ) на востоке Тихого океана Северного полушария и определяют район прохождения ядра СТ с вероятностью 30%, что увеличивает предсказуемость состояния тропосферы в года КЭН и ЭНМ, по сравнению с годами без событий Эль-Ниньо.

Облик и структура нейросетевой модели для изучения и прогнозирования состояния земной климатической системы

Солдатенко С.А.

Арктический и Антарктический научно-исследовательский университет, Санкт-Петербург, Россия
soldatenko@aari.ru

Ключевые слова: климатическая система, искусственный интеллект, глубокое обучение, нейронные сети, суррогатное моделирование, прогнозирование

Математическое моделирование находит свое применение во многих областях знаний, в том числе в науках об атмосфере и климате для изучения разнообразных явлений природы и процессов, протекающих в основных компонентах земной климатической системы (ЗКС). Исследование природных объектов математическими методами исходит из предположения, что существует соответствующий инструмент – математическая модель исследуемого объекта, описывающая его состояние и эволюцию на языке математики с той или иной степенью детализации. Современные климатические модели в наиболее общем виде представляют собой системы дифференциальных уравнений (ДУ) в частных производных, которые позволяют с приемлемой погрешностью описать основные физические свойства ЗКС и ее отдельных компонентов. Решение этих ДУ осуществляется численно и требует огромных вычислительных ресурсов. Сравнительно недавно в задачах исследования сложных систем получил распространение междисциплинарный подход, называемый суррогатным моделированием, предполагающий построение суррогатной модели, заменяющей физически обоснованную математическую модель объекта. Процесс построения суррогатных моделей основан на машинном обучении. На данный момент в мире существует несколько глобальных суррогатных моделей ЗКС, построенных на основе технологий глубокого обучения и используемых для прогнозирования погоды и моделирования климата. Точность суррогатных моделей ЗКС сравнима, а порой и превосходит, точность, которой обладают традиционные модели, однако затрачиваемое вычислительное время при их использовании уменьшается на порядки. В докладе рассмотрены облик и структура нейросетевой суррогатной модели, предназначенной для изучения и прогнозирования состояния ЗКС. Особое внимание обращено на модуль физики и модуль учета внешних воздействий на ЗКС. Изложен алгоритм решения задачи, технология обучения модели с возникающими здесь проблемами и дискуссионными вопросами.

Диагностические признаки интенсивной конвекции, проявляющиеся в данных дистанционных наблюдений

Спрыгин А.А.^{1,2}, Калмыкова О.В.^{1,2}

¹Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kov@feerc.ru

Ключевые слова: опасные конвективные явления, интенсивная конвекция, диагностические признаки, сигнатуры, спутники, метеорологические радиолокаторы, грозопеленгаторы

Мощные конвективные штормы и системы часто являются генераторами таких опасных явлений, как смерчи, сильные ветра, в том числе шквалы и деречо, крупный град, ливневые осадки, интенсивные грозы. Крайне важной задачей является заблаговременное предупреждение об угрозах их формирования.

Интенсивные конвективные процессы, порождающие мощные конвективные штормы и системы, зачастую могут быть обнаружены по прямым или косвенным признакам. Эти признаки проявляются в структуре данных дистанционных наблюдений, в первую очередь радиолокационных, спутниковых и грозопеленгационных. В литературе эти признаки часто именуют шаблонами или сигнатурами интенсивной конвекции. По результатам некоторых исследований установлена статистическая связь наблюдаемых признаков с регистрацией опасных конвективных явлений, что указывает на их потенциальную прогностическую значимость [1-3]. Природа проявления некоторых признаков до сих пор не изучена.

В настоящий момент наиболее широко представлены радиолокационные признаки интенсивной конвекции. Их насчитывается более 10 видов [2]. Эти признаки можно обнаружить по визуальному анализу изображений радиолокационной отражаемости и доплеровской скорости. Как правило, радиолокационные признаки связаны с особенностями пространственно-временного распределения гидрометеоров в структурах с сильным и устойчивым восходящим потоком.

Спутниковые признаки интенсивной конвекции обнаруживаются на изображениях верхней границы облаков в видимом и инфракрасном диапазонах спектра [1]. Они связаны с пробоем тропопавзы и последующим формированием холодных областей в верхней части шторма, внутри которых заключены более теплые области.

На угрозу формирования опасных явлений могут указывать и резкие скачки частоты грозových разрядов, вероятно, связанные с усилением восходящего потока. Для учета этих пульсаций разработаны специальные алгоритмы [3].

Обзор диагностических признаков выполнен в рамках проекта Российского научного фонда (№ 24-17-00357).

Литература:

1. Jurkovic P.M. Satellite signatures and lightning characteristics of Severe Convective Storms // Croatian Meteorological Journal. – 2017. – Vol. 52. – pp. 77-82.
2. Radar Signatures for Severe Convective Weather
https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures/index.htm
3. Schultz C.J., Petersen W.A., Carey L.D. Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather // J. Appl. Meteor. – 2009. – Vol. 48. – pp. 2543–2563.

Согласованность климатических изменений в разных временных масштабах в отдаленных районах северной Атлантики

Степанов Р.А.¹, Фрик П.Г.¹, Соколов Д.Д.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

rodion@icmm.ru

Ключевые слова: температурные колебания, малый ледниковый период, вейвлет-анализ

Работа посвящена исследованию согласованности климатических изменений в разных временных масштабах по обе стороны от Атлантики [1]. Выполнен анализ характерных вариации температуры по изотопом в льдах Гренландии за последние 1000 лет и по данным самых продолжительных метеорологических измерений температуры в Центральной Англии за последние четыре столетия. Используя методы вейвлет-анализа, получены оценки, в какой степени температурные вариации разных временных масштабов можно сравнивать при изучении двух отдаленных регионов северного полушария. Среди долгосрочных вариаций основное внимание было уделено похолоданию на рубеже XVIII века, которое произошло несколько позже в Гренландии, чем в центральной Англии, и потеплении, наблюдаемом в настоящее время. На коротких временных масштабах изучаемый диапазон ограничивается временами порядка 5-10 лет. Было установлено, что именно на этих масштабах колебания температуры в двух регионах относительно согласованы, а коэффициент кросс-корреляции достигает 0,6 для временных масштабов порядка 9 лет. Главный цикл солнечной активности также попадает в интервал значимых корреляций. Показано, что, несмотря на признанное отсутствие прямой корреляции между температурой и солнечной активностью, временная зависимость вейвлет-коэффициента кросс-корреляции двух температурных рядов на временном масштабе 11 лет воспроизводит долгосрочные вариации основного солнечного цикла, указывая на существование неявных связей вариаций планетарного масштаба с солнечной активностью. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (грант 22-61-00098).

Литература:

1. Stepanov R., Sokoloff D., Frick P. Consistency of climatic changes at different time scales in Central England and Greenland // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 264, 2024, 106343. DOI: 10.1016/j.jastp.2024.106343

Механизм арктического усиления в лабораторном аналоге общей циркуляции атмосферы

Сухановский А.Н.¹, Гаврилов А.А.², Васильев А.Ю.¹, Попова Е.Н.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН УрО РАН, Новосибирск, Россия*

san@icmm.ru

Ключевые слова: *арктическое усиление, лабораторная модель общей циркуляции атмосферы, бароклинные волны*

Представлены результаты экспериментального и численного моделирования потепления Арктики при помощи лабораторной модели общей циркуляции атмосферы [1]. Арктическое потепление реализуется путем изменения размера локального холодного теплообменника в "атмосферном" режиме, при котором структура среднего течения и бароклинные волн в лабораторной модели, подобны общей атмосферной циркуляции и волнам планетарного и синоптического масштабов. Лабораторное арктическое потепление приводит к относительно слабому отклику меридиональной и зональной циркуляции за исключением полярной области, где аналог полярной ячейки становится слабее, смещается ближе к средним радиусам и локализуется преимущественно в верхнем слое. Структура лабораторных аналогов ячеек Хэдли и Ферреля одинакова для всех рассмотренных конфигураций. Уменьшение скорости зонального потока (аналога западного ветра западного ветра) и изменение активности бароклинные волн в лабораторных средних широтах составило менее 10 %. Наиболее важным результатом данного исследования является заметная трансформация поля средней температуры. Центральная область и большая часть нижнего слоя становятся теплее, в то время как большая часть верхнего слоя и периферийной (экваториальной) части нижнего слоя становятся холоднее, что согласуется с результатами наблюдений и расчетов при помощи различных климатических моделей. Природа этого явления в лабораторной системе тесно связана с изменениями радиальных потоков тепла. Ослабление и смещение вверх аналога полярной ячейки, вызванное лабораторным потеплением Арктики, приводит к значительному уменьшению отрицательного теплового потока вблизи дна, что и приводит к повышению температуры в придонном слое. Подробно результаты исследования изложены в работе [2].

Литература:

1. Sukhanovskii A., Popova E. and Vasiliev A. A shallow layer laboratory model of large-scale atmospheric circulation // *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, Vol.117, N.3, 2023, P.155-176.
2. Sukhanovskii, A. and Gavrilov, A. and Popova, E. and Vasiliev, A. The study of the impact of polar warming on global atmospheric circulation and mid-latitude baroclinic waves using a laboratory analog // *Weather and Climate Dynamics*, 2024, Vol.5(2), P.863-880.

Инициализация сезонных ретроспективных прогнозов климатической модели INMCM5 с использованием техники притягивания

Тарасевич М.А.^{1,2,3}, Володин Е.М.^{1,2}

¹Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
mashatarasevich@gmail.com

Ключевые слова: сезонные прогнозы, климатическая модель, INMCM5, Ньютоновская релаксация

В рамках данной работы исследуется качество ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели INMCM5 [1] при задании начальных состояний с использованием техники Ньютоновской релаксации. Для выполнения настоящей работы с INMCM5 были проведены расчёты, в течение которых трёхмерные поля температуры воздуха и горизонтальных компонент скорости ветра, а также температуры и солёности океана притягивались к данным реанализов ERA5 [2] и SODA3.4.2 соответственно. Также исследуется влияние времён релаксации на качество получаемых начальных состояний и ретроспективных сезонных прогнозов. С подготовленных начальных данных выполнен расчёт серий ретроспективных прогнозов на зимние сезоны (ноябрь–февраль) 1993/1994–2009/2010 гг. Размер ансамбля составляет 20 членов.

Результаты ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели ИВМ РАН, полученные в рамках данной работы, сравниваются с результатами расчётов INMCM5, инициализированных в терминах аномалий и полными полями, а также, мультимодельного ансамбля WMO, состоящего из 12 прогностических систем. Для верификации результатов серии ретроспективных прогнозов INMCM5 используются пространственные распределения и глобально осреднённые значения коэффициента временной корреляции аномалий и среднеквадратической ошибки для приземной температуры воздуха и давления на уровне моря, которые вычисляются по средним за декабрь–февраль 1993/1994–2009/2010 гг. значениям. Предварительно данные INMCM5 и реанализа ERA5 интерполируются на регулярную широтно-долготную сетку $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, общепринятую для верификации долгосрочных прогнозов.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 20-17-00190, проведение расчётов с притягиванием). Расчёт серий ретроспективных сезонных прогнозов INMCM5 выполнен в рамках ВИПГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (соглашение № 169-15-2023-003 от 1 марта 2023).

Литература:

1. Володин Е. М., Мортиков Е. В., Кострыкин С. В., Галин В. Я., Лыкосов В. Н., Грицун А. С., Дианский Н. А., Гусев А. В., Яковлев Н. Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2017, Т. 53, № 2, С. 164–178.
2. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, V. 146, N. 730, pp. 1999–204

Алгоритм прогноза частоты опасных природных стихийных бедствий

Тетельмин В.В.

*Институт экологии Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва,
Россия*

v-tetelmin@rambler.ru

Ключевые слова: *глобальное потепление, интенсивность поглощения тепловой энергии, прогноз частоты стихийных бедствий*

Разработан и предлагается к использованию алгоритм прогноза частоты природных стихийных бедствий, спровоцированных глобальным потеплением. Приводится эмпирическая функция интенсивности поглощения парниковой тепловой энергии, в которой в качестве независимой переменной используется концентрация антропогенных парниковых газов в атмосфере.

Глобальное потепление сопровождается ростом частоты природных стихийных бедствий (ПСБ). В каждом последующем десятилетии на формирование одного ПСБ требуется в 1,25 раз больше накопленной тепловой энергии по сравнению с предыдущим. Эта особенность позволяет методом экстраполяции определять приращение частоты повторяемости ПСБ в следующем временном периоде. Приводится соответствующая функция.

Выполнен прогнозный расчет частоты повторяемости опасных метеорологических явлений в России до 2100 г.

Литература:

1. Тетельмин В.В. Алгоритм аналитического расчета глобального потепления и примеры расчета его основных последствий//Использование и охрана природных ресурсов в России. №2. 2024. С. 21-32.
2. Мохов И.И. Региональные климатические аномалии и тренды на фоне глобальных изменений//Коллективная монография "Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования". М.: РАН. 2024. С. 14-29.

Повторяемость атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций

Тимажев А.В.¹, Мохов И.И.^{1,2}

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

timazhev@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосферные блокирования, данные реанализа, явления Эль-Ниньо, Атлантическая мультидесятилетняя осцилляция, Тихоокеанская десятилетняя осцилляция

Представлены оценки региональных аномалий повторяемости летних и зимних атмосферных блокирований в Северном полушарии, диагностированных по данным реанализа ERA-5 для периода 1940–2023 гг. при разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций. В том числе получены количественные оценки региональной повторяемости блокирований при Эль-Ниньо разного типа, характеризующихся, в частности, индексами Nino3 и Nino4. В том числе, при нейтральной фазе явлений Эль-Ниньо в положительной фазе Тихоокеанской десятилетней осцилляции отмечено значимое превышение средних значений повторяемости зимних атмосферных блокирований для 40-летнего периода над Евро-Атлантическим и Тихоокеанским секторами. В фазе Эль-Ниньо отмечено существенное увеличение повторяемости атмосферных блокирований в отрицательной фазе Тихоокеанской десятилетней осцилляции, а также в положительной фазе Атлантической мультидесятилетней осцилляции, в частности, над Тихим и Атлантическим океанами.

Демонстрационная электротепловая модель климатической системы

Тихоненко Н.Д.^{1,2}, Докукин С.А.¹, Гинзбург А.С.¹

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

²НИЦ «Мэн Мейкер», Москва, Россия

n.tikhonenko@gismeteo.com

Ключевые слова: электротепловая аналогия, климат, климатическая система, атмосфера

Используя аналогию между тепловым потоком и электрическим током, температурой и напряжением, тепловым и электрическим сопротивлением, теплоёмкостью и электрической ёмкостью можно продемонстрировать процессы переноса энергии в климатической системе Земли с помощью эквивалентных электрических схем.

Методы расчета электрических цепей хорошо известны, существует множество методов для вычисления их параметров и характеристик элементов (см., например [1]), а электротепловые аналогии разрабатываются с середины прошлого века [2, 3]. В последние десятилетия стали появляться публикации о возможности построения электрических аналогий различных климатических процессов, например [4].

Это позволяет создавать динамические модели климатической системы, основанные на методе электротепловых аналогий, которые помогают наглядно продемонстрировать энергетические процессы и причинно-следственные связи в климатической системе.

В докладе представлены некоторые методы построения электротепловых аналогий и простейшая демонстрационная электротепловая модель климатической системы Земли.

Данная работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер 1021032424681-6-1.5.10;1.5.8;1.6.19.

Литература:

1. Lienhard J.H. IV and. Lienhard J.H. V A heat transfer textbook, 3rd Ed., Cambridge, MA, Phlogiston Press, 2008.
2. Robertson A.F. and Gross D. An Electrical-Analog Method for Transient Heat-Flow Analysis // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1958. V. 61. No.2
3. Gilaber P., Paris J. Thermal-Electrical Analogy Model of Heat Exchanges in a Solar Greenhouse // Applied Energy. 1988. V. 31.
4. Bonan G. Ecological climatology: concepts and applications 3rd Ed., Cambridge, 2016

Воспроизведение атмосферной циркуляции новой версией глобальной модели атмосферы ПЛАВ

Толстых М.А.^{1,2,3}, Фадеев Р.Ю.^{1,2,3}, Шашкин В.В.^{1,2,3}, Зарипов Р.Б.², Гойман Г.С.^{1,3,2}, Мизяк В.Г.²,
Алипова К.А.^{2,1}, Рогутов В.С.², Бирючева Е.О.²

¹Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия
mtolstykh@mail.ru

Ключевые слова: численный прогноз погоды, модель общей циркуляции атмосферы, ансамблевый прогноз погоды

Разработана новая версия глобальной модели атмосферы ПЛАВ [1], предназначенной для численного прогноза состояния атмосферы на различных пространственных и временных масштабах. По сравнению с более ранней версией ПЛАВ 2014 года введены новые, а также усовершенствованы ранее разработанные параметризации процессов подсеточного масштаба. Развитие и настройка параметризаций осуществлялись самим коллективом авторов с учетом всех возможных применений модели – как для счета краткосрочных (в том числе авиационных) и среднесрочных прогнозов с высоким пространственным разрешением, так и для более экономичного расчета долгосрочных ансамблевых прогнозов.

Оптимизированный для среднесрочного прогноза погоды вариант ПЛАВ10 впервые для отечественных глобальных моделей достиг пространственного разрешения зарубежных аналогов – около 10 км. ПЛАВ10 прошла оперативные испытания и в конце 2023 года внедрена в оперативную практику Гидрометцентра России. По результатам оперативной эксплуатации модели в нее были внесены определенные уточнения, в первую очередь в настройки модели – для корректного учета различных погодных ситуаций.

Важным направлением является развитие системы ансамблевого среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением около 20 км [2], где также достигнуто заметное повышение точности и информативности вероятностных прогнозов.

Оптимизированная для долгосрочных прогнозов версия ПЛАВ072L96 [3] с горизонтальным разрешением около 80 км также прошла как оперативные испытания внутри России, так и верификацию в рамках международных проектов, в первую очередь по субсезонным прогнозам [4]. Важным результатом развития этой версии модели является присвоение Гидрометцентру России в 2024 году статуса Глобального продуцирующего центра ВМО по субсезонным прогнозам.

Работы по развитию модели ПЛАВ частично выполнены при поддержке гранта РНФ 21-17-00254, в том числе, С.В.Травовой (Гидрометцентр России).

Литература:

1. Толстых М.А. и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. 2017. М.: Триада лтд., 166 стр.
2. Alipova K. et al. // Russ. J. Num. An. Math. Mod. 2024. V. 39, N1. P.1-11.
3. Толстых М.А. и др. //Метеорология и гидрология, 2024. №7, с. 25-39.
4. F. Vitart et al. //Bull. Amer. Met. Soc. 2017. V.98. P.163-173.

Предсказуемость атмосферной циркуляции совместной моделью SLNE: первые оценки

Фадеев Р.Ю.^{1,2}, Реснянский Ю.Д.², Струков Б.С.², Зеленько А.А.², Беляев К.П.^{3,4}, Кулешов А.А.⁴,
Толстых М.А.^{1,2}

¹Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

⁴Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

rost.fadeev@gmail.com

Ключевые слова: численный прогноз погоды, совместная модель, субсезонный прогноз, аномалия погоды

Совместная модель SLNE [1] является объединением моделей атмосферы ПЛАВ, океана NEMO и морского льда SI3. Обмен данными (граничными условиями) между моделями происходит в интерактивном режиме и реализован с применением программного обеспечения OASIS3-MCT и библиотеки SCRIP. В докладе обсуждаются первые результаты по исследованию качества воспроизведения атмосферной циркуляции моделью SLNE. Особое внимание уделяется оценке точности прогнозирования моделью сильных аномалий погоды на субсезонном масштабе (от двух до шести недель), таких как волны тепла 2010 и 2018 годов [2]. Использование стандартной методики Всемирной метеорологической организации (ВМО) для расчета ошибок предсказания метеорологических величин позволяет сделать выводы об успешности описания атмосферной циркуляции совместной моделью в сравнении с оперативными технологиями Гидрометцентра России на основе ПЛАВ072L96 [3] с тем же горизонтальным разрешением расчетной сетки.

Литература:

1. Fadeev R. Yu. The Parallel Performance of SLNE Atmosphere–Ocean–Sea Ice Coupled Model, JSFI, 2023. V. 10, no. 3, P. 36–60.
2. Fadeev R.Yu. Evaluation of 2010 heatwave prediction skill by SLNE coupled model, RJNAMM, V. 39, no. 4, 2024, pp. 199-208.
3. M. Tolstykh, R. Fadeev, V. Shashkin et al. The SLAV072L96 system for long range meteorological forecasts, Meteorol. and Hydrol, 2023, Vol. 7., P. 25-39.

Глобальная циркуляция и бароклинные волны средних широт в случае зонально однородных граничных условий

Фрик П.Г.¹, Сухановский А.Н.¹, Степанов Р.А.¹, Быков А.В.^{1,2}, Ветров А.Л.², Калинин Н.А.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

frick@icmm.ru

Ключевые слова: глобальная циркуляция, зонально однородная планета, бароклинные волны

Рассматривается упрощенная модель земной атмосферы, которая, с одной стороны, точно воспроизводит реальные характеристики Земли, а с другой - предельно упрощает конфигурацию континентов и океанов, полностью игнорируя топологию реальной планеты [1]. Целью исследования в данной постановке является анализ формирования крупномасштабных среднеширотных вихрей и волн на зонально однородной плоской планете с энергетическим балансом и свойствами атмосферы, аналогичными земным. Показано, что сохранение относительно небольшого экваториального океана на фоне плоской пустынной планеты достаточно для воспроизведения общей циркуляции атмосферы и динамики среднеширотных волновых и вихревых структур, планетарного и синоптического масштабов, реалистичных для Земли. Рассмотренная идеализированная система хорошо воспроизводит не только пространственную структуру возникающих бароклинных волн, но и их сезонную динамику, включая изменчивость спектрального состава наблюдаемых волн. Моды с волновыми числами 3-8 содержат основную часть энергии пульсаций. Спектры для высших мод характеризуются степенным законом с наклоном “-3.5” для зимнего сезона и “-3” для летнего сезона. В течение бароклинного сезона происходит уменьшение доминирующего волнового числа от $m=7$ до $m=4$. Другой особенностью бароклинных волн в рассматриваемой конфигурации является значительная временная вариация фазовой скорости с двумя отчетливыми стадиями монотонного увеличения и уменьшения. Между началом постепенного увеличения фазовой скорости для разных мод существует временной разрыв. Высшие моды начинают ускоряться раньше, в результате чего низшие моды движутся медленнее высших. Временная эволюция интенсивности бароклинных волн хорошо описывается параметром Иди.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-61-00098

Литература:

1. Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А. Численное моделирование предельных состояний планетарной атмосферы // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 4 (67). С. 85-98. DOI 10.17072/2079-7877-2023-4-85-98.

Оценка поглощения углерода из атмосферы наземными экосистемами с помощью Модели Земной системы ИВМ РАН

Черненко А.Ю.^{1,2}, Володин Е.М.^{1,2}

¹Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

chernenkova197@gmail.com

Ключевые слова: климат, модель Земной системы, углеродный цикл, наземные экосистемы

Модель Земной системы ИВМ РАН [1] постоянно развивается, недавно в нее был внедрен обновленный модуль наземного углеродного цикла [2]. Его ключевая особенность заключается в учете влияния антропогенной активности (вырубка лесов, расширение возделываемых территорий, сбор урожая с них) на круговорот углерода на суше. Эффект, связанный с меняющимся во времени землепользованием, моделируется с помощью набора предписанных среднегодовых данных о пространственном распределении растительности. Данная параметризация описывает как исторический период, так и различные сценарии будущего. В работе представлены оценки поглощения атмосферного углерода наземными экосистемами по данным МЗС ИВМ РАН в период с 1850 г. по 2100 г. Оценки сравниваются с данными наблюдений, а также с результатами мультимодельного ансамбля CMIP6 [3].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ No 20-17-00190).

Литература:

1. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2023, 59(1), С.19—26.
2. Chernenkov A.Yu., Volodin E.M. New land use parameterization for INM-CM terrestrial carbon cycle module. Numerical Methods and Programming, 2024, 25(3), P.315–325.
3. V. Eyring et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geosci. Model Dev., 2016, 9(5), P.1937—1958.

Оценка связи интенсивности осадков с температурой и влажностью воздуха по данным плювиографических наблюдений с высоким временным разрешением

Чернокульский А.В.^{1,2}, Козлов Ф.А., Алешина М.А.^{1,2}, Семенов В.А.^{1,2}, Швець Н.В.³

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

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, Обнинск, Россия

a.chernokulsky@ifaran.ru

Ключевые слова: ливневые осадки, обложные осадки, глобальные изменения климата, температура

Современные изменения климата обуславливают интенсификацию гидрологического цикла, включая рост влагосодержания атмосферы и интенсивности ливневых осадков [1]. Связь локальной температуры воздуха и интенсивности сильных осадков не линейна: в ряде российских регионов летний максимум осадков отмечается при температуре воздуха в районе 15–20°C, а дальнейший рост температуры приводит к снижению интенсивности [2]. Этот результат получен на основе суточных данных об осадках.

В данной работе проведен анализ интенсивности сильных осадков и её связи с температурой и влажностью воздуха по данным плювиографических наблюдений с более высоким (10-минутным) разрешением [3]. Всего проанализировано 1845 событий сильных осадков ≥ 20 мм, из них 1621 с ливневыми осадками и 224 с обложными) по данным 29 метеорологических станций, расположенных в Центральном федеральном округе, для сезона с мая по октябрь для периода 1984–2018 гг.

Анализировались средняя и максимальная интенсивность, продолжительность дождя, максимальная сумма осадков, выпавшая за 1 час. Медианное значение эмпирического распределения максимальных 10-минутных значений интенсивности осадков составило для сильных ливней 0,28 мм/мин, а 95й перцентиль — 1,15 мм/мин. Для обложных осадков эти значения составили 0,13 мм/мин и 0,42 мм/мин, соответственно.

Для анализируемого региона и периода отмечена положительная зависимость интенсивности осадков от температуры и влажности воздуха, при этом для ливневых осадков проявляется более сильная зависимость. В частности, коэффициент ранговой корреляции Манна-Кендалла между средней 10-минутной интенсивностью осадков и максимальной температурой воздуха составляет 0,41 для ливневых осадков и 0,36 для обложных осадков (уровень значимости 0,001). При росте температуры на 1 интенсивность ливневых осадков возрастает на 0,067 мм/мин, а обложных — на 0,022 мм/мин, что соответствует зависимости логарифма интенсивности осадков от температуры на уровне 10,4%/1°C и 6,7%/1°C, соответственно.

Литература:

1. Chernokulsky A.V. et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decade. ERL, 2019, 4, 045001.
2. Aleshina M.A. et al. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data. ERL, 2021, 16, 105004.
3. Швець Н.В. Интенсивность осадков: методы измерений, базы данных наблюдений... . Труды ВНИИГМИ-МЦД, 2020, 186, 69–89.

О связи современных многолетних колебаний температуры воды в Мировом океане с особенностями повторяющихся изменений в динамике Солнечной системы

Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б.

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных, Обнинск, Россия
boris_sher@mail.ru*

Ключевые слова: изменения климата, океан, внешние факторы климата, эндогенное тепло Земли

Важнейшим фактором колебаний климата атмосферы являются термодинамические изменения в океане. Ранее была показана связь многолетних колебаний температуры поверхности океана на основных океанических течениях Мирового океана с барицентрическим вращением Солнечной системы. Движение Солнца вокруг общего центра масс всей системы увлекает за собой Землю и передает дополнительный вращательный момент ко всей Земле в целом и ко всем ее средам: океану [1], атмосфере и, предположительно, к жидкому слою мантии Земли, вызывая в ней возмущения и активизацию вулканической деятельности с выходами эндогенного тепла на поверхность земной коры.

Большинство вулканов находится в Мировом океане, поэтому слежение за выделением эндогенного тепла осуществлялось по изменениям температуры воды у океанского дна в узлах географической сетки $\lambda 1^\circ$ Мирового океана за 1960 – 2022 гг. Методами корреляционного анализа обнаружено, что при усилении внешнего воздействия усиливались выходы эндогенного тепла Земли в Мировой океан преимущественно в регионах прохождения границ литосферных плит Земли в зонах спрединга, субдукции и вблизи островов вулканического происхождения [2].

Наибольшее количество узлов с выходами эндогенного тепла оказалось в Тихом океане во всей полосе Тихоокеанского вулканического огненного кольца и в Средиземноморско-Индонезийском вулканическом поясе. Это районы с условиями рельефа океанического дна наиболее благоприятными для выхода мантийного тепла на поверхность. Активизация выхода эндогенного тепла в океан регулируется небесной механикой.

Наличие указанной зависимости подтверждает исходную гипотезу о заметном вкладе эндогенного тепла Земли в температуру воды у океанского дна. Это означает, что Солнце не единственный источник тепла в климатической системе. Эндогенное тепло вносит свой вклад в изменения придонной температуры, но еще предстоит количественно оценить его роль в колебаниях климата.

Литература:

1. Шерстюков Б.Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2021, 222 с.
http://mete.ru/wp-content/uploads/2024/03/sherstyukovb_-2021_print-m1.pdf
2. Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. Космос и тектоника Земли как регуляторы выхода эндогенного тепла в океан // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 207—233. doi:10.33933/2713-3001-2023-75-207-233.

Применение машинного обучения для создания адаптивных алгоритмов распознавания угроз конвективных опасных явлений

Шершакова А.О.

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

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

ana.shershakova@yandex.ru

Ключевые слова: наука о данных, интеллектуальный анализ данных, машинное обучение, математическая модель, прогноз, наукастинг, водяные смерчи, облачные ячейки

Машинное обучение (МО) занимается разработкой алгоритмов, способных к самообучению на основе эмпирических данных. В метеорологии его применение актуально из-за сложности атмосферных процессов, в особенности опасных погодных явлений (ОЯ), вызывающих проблемы для прогнозирования традиционными моделями. С помощью МО можно анализировать большие объемы данных, выявлять скрытые закономерности, адаптироваться к изменяющимся условиям [1].

В ходе работы исследовались методы интеллектуального анализа данных и МО для создания прогностических моделей наукастинга ОЯ, изучались водяные смерчи над Черным морем [2]. Использовались спутниковые данные для решения задачи классификации облачных ячеек по степени опасности формирования из них водяных смерчей. Для построения предикторов прогнозирования, учитывающих различные временные масштабы накопленных данных о состояниях ячеек для анализа изменения характеристик, была адаптирована методология Meteo-France [3].

На базе специально подготовленных данных было разработано и протестировано семейство моделей, основанных на девяти классах МО. Избранные модели прошли независимую проверку, продемонстрировав свою практическую применимость для конвективных ОЯ. Тестирование в квазиоперативном режиме показало способность моделей идентифицировать смерчеобразующие облака, а также предвосхищать их формирование благодаря чувствительности к изменениям полученных предикторов.

Таким образом, модели позволяют проводить детальный анализ динамики характеристик ячеек, осуществлять классификацию и прогнозировать свойства конвективных областей. В перспективе планируется усовершенствование моделей путем накопления новых данных и интеграции радиолокационных данных. Планируется внедрение глубокого обучения с использованием нейронных сетей для извлечения новых зависимостей из расширенного объема данных.

Литература:

1. Chantry M. et al. Machine learning in weather and climate modelling: hard, medium and soft AI // Phil. Trans. R. Soc. A. 2021. V. 379. №2194. P. 20200083.
2. Калмыкова О.В. Водяные смерчи в России и в мире: климатология и условия возникновения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. №4. С. 421-436.
3. Algorithm Theoretical Basis Document for the Convection Product Processors of the NWC/GEO. MFT, 2022. 65 c. NWC/CDOP3/GEO/MF-PI/SCI/ATBD/Convection. Issue 1, Rev 0.1.

Долгоживущие сильные шквалы в лесной зоне России

Шихов А.Н.^{1,2}, Чернокульский А.В.^{2,3}, Ярынич Ю.И.^{2,4,5}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт географии РАН, Москва, Россия

⁴Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
and3131@inbox.ru

Ключевые слова: долгоживущие сильные шквалы, ветровалы, синоптические и мезомасштабные условия

Долгоживущие сильные шквалы, представляют собой одно из наиболее опасных конвективных явлений погоды, поскольку охватывают значительные территории, способны вызвать значительные человеческие потери, экономический ущерб и катастрофические ветровалы в лесных массивах. Целью настоящей работы была систематизация данных о долгоживущих сильных шквалах, условиях их возникновения в лесной зоне России и наносимом ущербе. Созданная выборка включает 46 случаев шквалов или смешанных вспышек, когда наблюдались как шквалы, так и смерчи, но основной ущерб связан со шквалами. В 30 случаях по данным метеостанций были зафиксированы порывы ветра ≥ 25 м/с (в том числе в 16 случаях ≥ 30 м/с). Ущерб от шквалов включает человеческие потери (по имеющимся данным, не менее 87 погибших и 556 травмированных), повреждения зданий и сооружений, нарушений электроснабжения и нарушения лесного покрова. Данные о материальном и экономическом ущербе имеют фрагментарный характер. Общая площадь ветровалов, вызванных рассматриваемыми случаями шквалов, составляет ≈ 311 тыс. га, или 54,8% от общей известной площади ветровалов на ЕТР и в Сибири. Наиболее масштабные ветровалы от шквалов на ЕТР отмечены 27.06.2010 и 29.07.2010 гг., в Сибири – 16.07.2004 и 23.07.2022 гг.

Для анализа условия возникновения шквалов рассчитаны значения конвективных параметров вдоль треков мезомасштабных конвективных систем (МКС), вызвавших шквалы, на основе базы данных конвективных параметров на территории Северной Евразии (Чернокульский и др., 2022). Большинство шквалов связаны с МКС масштаба мезо- α мезомасштабными конвективными комплексами и линиями шквалов). Продолжительность жизни МКС составляли от 4 ч до 16 ч. На основе данных реанализа ERA5 показано, что условия возникновения подавляющего большинства случаев характеризуются сочетанием умеренной или сильной конвективной неустойчивости и высоких скоростей ветра в средней тропосфере (≥ 0 м/с), что благоприятно для формирования долгоживущих конвективных штормов.

Литература:

1. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология, 2022, № 5, с. 27–42.

Оценка связей пространственно-временного распределения ветровалов в лесной зоне России с конвективными параметрами атмосферы и молниевой активностью

Шихов А.Н.^{1,2}, Чернокульский А.В.^{2,3}, Ярынич Ю.И.^{2,4,5}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт географии РАН, Москва, Россия

⁴Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия
and3131@inbox.ru

Ключевые слова: шквалы, смерчи, ветровалы, реанализ ERA5, конвективные параметры атмосферы, пространственно-временное распределение, молниевая активность

Выполнен совместный анализ данных о ветровалах, вызванных шквалами и смерчами в лесной зоне России в 2001-2020 гг. (всего 1816 случаев), значений конвективных параметров атмосферы, рассчитанных по данным реанализа ERA5 и маркирующих условия возникновения шквалов и смерчей, и молниевой активности по данным сети грозопеленгации WWLLN. Установлено, что пространственное распределение конвективных параметров за летние сезоны 2001-2020 гг. статистически значимо коррелирует с пространственным распределением ветровалов как на ЕТР, так и в Сибири. В наибольшей степени эта корреляция выражена для параметра значительного торнадо STP, максимумы значений которого приходятся на центральную часть лесной зоны. В Сибири зависимости пространственного распределения ветровалов и конвективных параметров атмосферы несколько слабее, чем на ЕТР, что объясняется завышением значений конвективных параметров в горах Южной Сибири. Также хорошо выражена и статистически значима корреляция между площадью ветровалов и плотностью молниевых разрядов. Межгодовая изменчивость значений конвективных параметров за теплый период и числа случаев ветровалов также имеет в основном синхронный характер. Наиболее сильная корреляция выявлена между числом дней со закритическими значениями параметра STP и числом случаев ветровалов за сезон. Полученные результаты позволяют отнести параметр значительного торнадо STP и плотность молниевых разрядов к числу информативных предикторов, которые должны учитываться при оценке и картографировании рисков, связанных со шквалами и смерчами на территории России.

Распознавание облачности глубокой конвекции по дистанционным данным геостационарных МИСЗ с помощью методов машинного зрения

Шишов А.Е., Горлач И.А.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
ia_gorlach@mail.ru

Ключевые слова: облачность глубокой конвекции, верхняя граница, автоматическое распознавание, система мониторинга облачности глубокой конвекции, методы машинного обучения

Существует достаточно много алгоритмов автоматического определения контуров верхней границы (наковален) мощной облачности глубокой конвекции. Сложность решений проблемы распознавания в том, что изменчивость по времени, пространству и площади требует учащенных наблюдений (<15 мин), высокого разрешения спутниковых данных (< 10 км/п), объективных оценок площади и топографии верхней границы (ВГ) облачности глубокой конвекции (ОГК), измерений температуры и фазового состава. Существующие алгоритмы не всегда оптимальны с точки зрения вычислительных ресурсов для оперативных задач по обработке, представлению и визуализации информации.

В представляемой работе на примере случая развития мощных МКС 15-16 апреля 2024 г. показана реализация применения методов формализации параметров формы ВГ ОГК, оценки площади контуров ВГ и топографии, времени жизни ячеек МКК. Применение методов автоматического распознавания объектов МКС на основе использования машинного зрения, градиентного бустинга [1] позволили реализовать оперативную систему мониторинга ОГК (СМОГК) [2]. Система включает комплекс данных наблюдений за опасными явлениями, включая наземные данные грозоотметчиков, данные полей давления и геопотенциала, температуры, на основных изобарических поверхностях на основе моделей ICON-13, COSMO-ru6.6, COSMO-ru2.2 радарных данных отражаемости и расчетных данных о тропопаузе и др. Исследования с помощью СМОГК позволили оценивать в конкретных пунктах в режиме реального времени расхождения и ошибки дистанционных и наземных измерений.

Исследование проведено в рамках НИР Росгидромета АААА-А20-120021490079-3

Литература:

1. Шишов А.Е. Способ объектно-ориентированного распознавания облачности глубокой конвекции на основе данных геостационарного МИСЗ с применением машинного обучения // Метеорология и гидрология. — 2023. — №4. — С. 78-90.
2. Шишов А.Е., Горлач И.А. Система мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК) // ФГБУ «Гидрометцентр России». — 2022. — Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ (РИД) N 2022680485 от 01.11.2022.
3. Космический аппарат типа «Арктика-М» веб-сайт АО «Российские космические системы», <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/orbitalnaya-gruppirovka-ka-dzz/arktika-m/>

Статистическое моделирование влияния метеоусловий на концентрацию приземного аэрозоля в мегаполисе в зимнее время

Александров Г.Г., Виноградова А.А., Гинзбург А.С., Губанова Д.П.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gleb@ifaran.ru

Ключевые слова: Москва, приземный аэрозоль, PM_{10} , $PM_{2.5}$, массовая концентрация, метеорологические параметры, статистическое моделирование

Изменчивость атмосферного аэрозоля в мегаполисе связана не только с антропогенными воздействиями, но и с метеорологическими условиями. Поэтому возникает необходимость в оперативной оценке и прогнозировании качества приземного воздуха мегаполиса с учетом метеорологических факторов.

В данной работе исследуется вопрос влияния температуры и относительной влажности воздуха на концентрацию PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземном воздухе Москвы в зимний период (январь, февраль) 2022-2024 годов по данным измерений [1] и расчетов с помощью статистической модели [2, 3].

Для PM_{10} в январе 2022 года учет относительной влажности в качестве предиктора увеличивает коэффициент корреляции результатов расчета и данных измерений с 0.28 до 0.52, что указывает на важную роль влажности в формировании PM_{10} . В январе 2023 года коэффициент корреляции для всех случаев остался практически неизменным (0.73), т.е. концентрация аэрозоля практически не зависела от метеоусловий. Для января 2024 года учет относительной влажности дает некоторое улучшение, но менее значительное, чем в январе 2022 года.

Для февраля всех трёх годов учет влажности увеличивает коэффициент корреляции в среднем на 0.2 по сравнению с расчетом по простой авторегрессионной модели (без учета метеопараметров), а добавление температуры – на 0.1, что говорит о повышении роли температуры и влажности воздуха в формировании аэрозоля в городе в конце зимы.

Для $PM_{2.5}$ в зимних условиях корреляция результатов измерений и расчетов возрастают с добавлением метеорологических предикторов и основной прирост (в среднем на 0.13) даёт учет влажности.

Таким образом, модельные оценки показывают, что наибольшее влияние на концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ в зимний период в Москве оказывает относительная влажность воздуха, что хорошо согласуется с эмпирическими зависимостями концентрации аэрозолей в приземном воздухе Москвы от влажности [4].

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФА РАН, измерения и расчеты – при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-27-00063).

Литература:

1. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Лезина Е.А. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 6. С. 754-773.
2. Демченко П.Ф., Гинзбург А.С., Александров Г.Г. и др. // Метеорология и гидрология. 2015. №. 10. С. 31-43.
3. Alexandrov G.G., Ginzburg A.S. // Geography, environment, sustainability. 2024. V. 17. №. 3. P. 19-34.
4. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иорданский М.А. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 3. С. 334–348.

Особенности состава воздуха над Российским сектором Арктики и прилегающими территориями

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б.,
Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М.,
Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
bbd@iao.ru

Ключевые слова: Арктика, атмосфера, воздух, газы, состав

Для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газового и аэрозольного состава воздуха над Российским сектором Арктики ИОА СО РАН на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» провел цикл исследований атмосферы и водной поверхности над акваториями всех морей Северного Ледовитого океана и прилегающими территориями. В ходе самолетного зондирования были измерены профили концентрации газов и аэрозоля от минимально допустимых высот 200 метров над морем 500 метров над сушей до верхней тропосферы. В настоящем сообщении представлено обобщение результатов по зондированию пространственного распределения газов и аэрозоля. В отличие от стандартных представлений, для анализа используются не вертикальные профили, а специально построенные разрезы.

Оказалось, что имеется существенная разница изменения концентрации CO_2 по долготе в свободной тропосфере и в пограничном слое атмосферы. В свободной тропосфере это находит отражение в уменьшении его содержания с запада на восток. В пограничном слое картина иная. Концентрация в приводном слое воздуха значительно ниже, чем в свободной тропосфере на всем протяжении акватории Российского сектора Арктики. Если рассматривать его содержание внутри пограничного слоя, то здесь, в отличие от вышележащих слоев, тенденция обратная, оно возрастает с запада на восток.

Концентрация метана в пограничном слое (>2040 млрд⁻¹) существенно выше, чем в свободной атмосфере (<1940 млрд⁻¹). При этом, при общей тенденции уменьшения содержания с запада на восток, выделяется Карское море, где наблюдается его всплеск. Проведенный анализ показал, что в данном случае наблюдался перенос CH_4 с материка на акваторию океана.

Содержание остальных газовых компонентов и аэрозоля над морскими акваториями Российского сектора Арктики оказались по величине очень низкими, которые характерны для фоновых районов.

Измерения концентраций CO₂ в акватории ЮБК летом 2024г

Артамонов А.Ю.^{1,2,3}

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

²Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

³Югорский государственный университет, НОЦ-кафедра ЮНЕСКО "Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата", Ханты-Мансийск, Россия

sailer@ifaran.ru

Ключевые слова: парниковые газы

В связи с увеличивающейся в последние годы антропогенной нагрузкой возрастает актуальность изучения изменений климата, тесно связанных с изменением концентрации парниковых газов. Получение новых натурных данных необходимо для выявления региональных особенностей глобальных климатических изменений и экологического мониторинга крымского сектора Черного моря. Эти данные в дальнейшем могут использоваться при параметризации в моделях деятельного слоя моря и приводного слоя атмосферы.

Подробные исследования пространственной структуры концентрации углекислого газа и интенсивности его потоков на границе двух сред в приповерхностном слое атмосферы проводились в ходе 131-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Работы выполнялись в весенне-летний период (27 мая – 20 июня) 2024 г. вдоль побережья Южного Берега Крыма в пределах территориальных вод России. Измерения концентрации CO₂, паров H₂O и метеопараметров (скорость и направление ветра, температура и влажность, давление) осуществлялись на протяжении всего рейса – при движении судна, на дрейфовых станциях и в период ночных стоянок у берега. Использовался газоанализатор CO₂/H₂O открытого типа со встроенным 3D анемометром (Integrated CO₂/H₂O Open-Path Gas Analyzer and 3D Sonic Anemometer (IRGASON)) производства Campbell Scientific США, который был установлен на носовой мачте судна на высоте 10,4 м. Запись трех компонентов скорости ветра, акустической температуры и концентрации углекислого газа и паров воды осуществлялась непрерывно. По этим высокочастотным данным, используя метод турбулентных пульсаций (Eddy Covariance), рассчитывались потоки CO₂, явного и скрытого тепла, момент импульса, динамическая скорость ветра. К сожалению, в связи с техническими сложностями по независимым от нас обстоятельствам, непрерывная запись координат во время движения отсутствовала, поэтому пока мы не можем сделать коррекцию на скорость судна в явном виде.

Предварительный анализ полученных данных показал существенную пространственную изменчивость измеренных параметров, обусловленную заметными суточными колебаниями и синоптическими вариациями в системе океан-атмосфера. На особенностях пространственных распределений также оказывает влияние несинхронность выполнения съемки.

Показано, что концентрации CO₂ и паров H₂O изменялись от 418 до 450 ppm и от 10 до 21 ppm, соответственно. Максимальные концентрации CO₂ (до 456 ppm) наблюдались в ночное время, когда судно стояло на якорю и интенсивность процессов фотосинтеза была минимальной.

В целом диапазон значений концентрации CO₂ и паров H₂O в границах полигона находился в пределах естественной изменчивости этих параметров.

Временные вариации элементного и дисперсного состава атмосферного фоновых аэрозоля в Крыму весной-летом 2020 года

Артамонова М.С.¹, Чхетиани О.Г.¹, Лапченко В.А.², Иорданский М.А.¹, Максименков Л.О.¹

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

²Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского - природный заповедник РАН филиал ФГБУН
ФИЦ Института биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Феодосия, Россия

artamonova@ifaran.ru

Ключевые слова: фоновый аэрозоль, Крым, элементный состав, массовая концентрация химических элементов, Крым

Экспериментальные исследования по изучению состава и временной изменчивости аэрозоля в приземном слое атмосферы проводились в юго-восточной части Крымского полуострова на станции фоновых экологического мониторинга (СФЭМ) Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН с 21 марта по 17 июня 2020 г. Местоположение станции исключает заметное влияние местных и региональных источников загрязнения, что позволяет рассматривать собранные данные, как фоновые для данного региона.

Приведены результаты анализа временных вариаций среднесуточных массовых концентраций аэрозоля, его фракций (PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₅), и 25-ти основных химических элементов в сопоставлении с направлением ветра и траекториями переноса воздушных масс. Концентрации всех исследованных химических элементов не превышали ПДК для загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Исключение составили высокие концентрации элементов во время эпизода мощного восточного переноса 25-27.03.2020 из района пыльной бури на Аравии. Проведенный корреляционный анализ значений массовой концентрации химических элементов и химических элементов со счетными концентрациями фракций аэрозоля, подтвердили антропогенное происхождение ряда тяжелых металлов и металлоидов (Zn, Mo, Cd, Pb, Bi, Se, Sn, Sb,) и терригенно/глобальное происхождение таких элементов, как Al, Mg, Ca, Na и K, Fe, Cr, Mn, Ni, Co, La, Th, U. Элементы S, P, Cu, Hg, для которых не установлены значимые корреляции, имеют смешанное происхождение – как от естественных так и от антропогенных источников, влияние которых преобладает в зависимости от направления прихода воздушной массы в точку измерений.

Работа выполнена при поддержке РНФ гранта № 20-17-00214-П.

Экспериментальные исследования аэрозоля в Крыму в 2018-2024 гг.

Артамонова М.С.¹, Чхетиани О.Г.¹, Лапченко В.А.², Иорданский М.А.¹, Максименков Л.О.¹

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

²Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского - природный заповедник РАН филиал ФГБУН
ФИЦ Института биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Феодосия, Россия

artamonova@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, массовая концентрация, Крым

Представлены результаты экспериментальных исследований аэрозоля в приземном слое атмосферы на станции фоновое экологического мониторинга (СФЭМ) КНС – ПЗ РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ, расположенной в Карадагском заповеднике на юго-востоке Горного Крыма. Измерения проводились в разные сезоны с 2018 по 2024 гг. Одновременно с измерениями на СФЭМ в сентябре- октябре 2020 и 2021 гг., были проведены аналогичные измерения аэрозоля на южном берегу Крыма на станции Морского гидрофизического института РАН (МГИ РАН), расположенной в пос. Кацивели.

Использовались отечественные 9 канальные аэрозольные счетчики - лазерный ЛАС-П (0,15-5 мкм) и оптико-электронный ОЭАС (0,2-5 мкм). Для определения среднесуточной массовой концентрации и элементного анализа аэрозоля производился аспирационный отбор проб на фильтры АФА-ХА-20 со скоростью прокачки 14 м³/ч. Время отбора каждой пробы составляло 24 часа.

Массовая концентрация аэрозоля по взвешенным фильтрам для разных сезонов года на СФЭМ варьировалась от 2 до 65 мкг/м³, а при эпизодах восточного переноса аэрозоля через Калмыкию в Крым во время пыльных бурь на Арале повышалась до 195 мкг/м³. Массовая концентрация аэрозоля на южном берегу Крыма в осенний период 2020-2021 гг. изменялась в диапазоне 3-15 мкг/м³.

Элементный анализ аэрозольных частиц осуществлялся с помощью атомно-эмиссионного спектрометра TRACE ICAP 61E (производства фирмы Thermo Jarrell Ash, США). Элементный состав аэрозоля в марте- июне 2020 г. представлен в докладе «Вариации элементного и дисперсного состава атмосферного фоновое аэрозоля в Крыму весной-летом 2020 года», где приведены зависимости массовой концентрации, дисперсного и элементного состава приземного аэрозоля от дальней аэрозольной миграции и направления ветра.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 20-17-00214-П).

Мониторинг аэрозоля на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА в 2010-2020 гг.

Артамонова М.С., Сеник И.А., Чхетиани О.Г., Обвинцев Ю.И., Максименков Л.О.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
artamonova@ifaran.ru, senik_ia@list.ru

Ключевые слова: фоновый и городской аэрозоль, Кисловодск, Шаджатмаз, Кавказские Минеральные Воды, счетная и массовая концентрация, элементный состав, трансграничный перенос

Представлены результаты экспериментальных исследований аэрозоля в приземном слое атмосферы на 2-х площадках станции ИФА им. А.М. Обухова РАН – на плато Шаджатмаз и в городе Кисловодске. Измерения аэрозоля проводились в период с 2010 по 2020 гг.

При экспериментальных исследованиях использовались отечественные аэрозольные приборы. Для измерений счетной концентрации на плато Шаджатмаз использовался 9 канальный аэрозольный лазерный счетчик ЛАС-П с диапазоном каналов 0.15-1.5 мкм, на станции в городе - оптико-электронный счетчик ОЭАС, с диапазоном каналов 0.2-5.0 мкм. В отдельные периоды измерений проводился отбор проб на фильтры АФА-ХА-20 (аспирационными пробоотборниками) со скоростью прокачки 14 м³/ч, для определения среднесуточной массовой концентрации аэрозоля и для определения его элементного состава.

Приведены распределения счетной и массовой концентрации аэрозоля для двух измерительных площадок в период 2010 -2020 гг., представлен элементный состав аэрозоля в разные годы и для разных сезонов измерений. Отмечено, что в 2015 году в г. Кисловодске, из-за расположенной в черте города недалеко от точки измерений свалки мусора, которую регулярно поджигали, зарегистрированы повышенные массовые концентрации аэрозоля в зимний и весенний период. Значения массовой концентрации таких химических элементов как свинец, медь, цинк, превышены в несколько раз. На плато Шаджатмаз зарегистрированы эпизоды трансграничного переноса аридного аэрозоля из Казахстана. Включены данные отдельных маршрутных измерений аэрозоля в регионе Кавказских Минеральных Вод.

Элементный анализ аэрозольных частиц, содержащихся в пробах на фильтрах АФА ХА-20, осуществлялся методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с помощью атомно-эмиссионного спектрометра TRACE ICP 61E (производства фирмы Thermo Jarrell Ash, США).

Работа выполнена при поддержке РНФ гранта № 20-17-00214-П.

Лидарные исследования особенностей суточной динамики вертикальной структуры атмосферного аэрозоля в летний период над прибрежной территорией озера Байкал

Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Коханенко Г.П., Насонов С.В., Новоселов М.М., Пеннер И.Э.

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

nsvtsk@iao.ru

Ключевые слова: аэрозоль, озеро Байкал, лидар, планетарный пограничный слой, метеопараметры атмосферы

В работе обсуждаются результаты регулярных лидарных исследований пространственной структуры атмосферного аэрозоля в летний период, осуществляемых на озере Байкал, на научном стационаре «Боярский» Института физического материаловедения СО РАН (51.83°N, 106.06°E), республика Бурятия, Россия. За счет таких физико-географических особенностей озера как горное окружение со всех сторон хребтами, а также большой объем воды, в точке проведения измерений отмечена определенная специфика температурно-ветрового режима, которая влияет на формирование и перенос аэрозоля в нижней тропосфере. Наблюдения проводились с использованием наземного аэрозольно-рамановского лидара «ЛОЗА-М2». Совместно с лидарными данными проводился анализ общей метеорологической ситуации в регионе и анализ метеопараметров атмосферы над местом наблюдений.

В ходе работы исследована суточная динамика распределения аэрозоля в атмосфере за период с 2015 по 2023 гг. в условиях действия различных воздушных масс в регионе. Выявлено три основных типа переноса воздушных потоков, характерных для береговой зоны южного Байкала в летний период. Это, в первую очередь, действие бризовой циркуляции. В этом случае основные изменения пространственной структуры аэрозоля происходят в 2-3 км слое и определяются сменой направления переноса внутри бризовой ячейки в течение суток. Второй тип ситуаций относится к юго-западному переносу, когда над регионом проходили антициклоны. Для этих случаев отмечалась наибольшая высота наблюдаемых аэрозольных слоев, достигающая 7 км. Наиболее сложные и динамичные изменения в суточной пространственной структуре аэрозоля в атмосфере наблюдались в условиях переноса над Байкалом циклонов и связанных с ними атмосферных фронтов. В таких ситуациях в течение суток может происходить снижение высоты наблюдаемых аэрозольных слоев во всем диапазоне высот от приземного слоя до 3-4 км.

Обработка и анализ полученных экспериментальных данных проводились в рамках проекта РНФ № 22-77-10043.

Возможности исследования аэрозольного состава атмосферы с помощью аэрозольного зонда обратного рассеяния

Балугин Н.В.¹, Юшков В.А.¹, Фомин Б.А.¹, Суханов А.Я.², Маричев В.Н.², Бочковский Д.А.²

¹Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия

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

v_yushkov@mail.ru

Ключевые слова: аэрозоль, обратное рассеяние, тропосферный аэрозоль, стратосферный аэрозоль, баллонное зондирование, оптические параметры

Аэрозольный зонд обратного рассеяния (АЗОР) (как и лидар) дает информацию о вертикальном распределении коэффициента обратного аэрозольного рассеяния на длине волны зондирования, которая позволяет идентифицировать в атмосфере слоистую структуру аэрозольной компоненты. Для применения АЗОР созданы все технические возможности (зонд, телеметрия, измерители Т, навигация, программное обеспечение приема ТМ информации и т.п.). В отличие от лидара зонд позволяет легко реализовать 2-х волновое зондирование, которое дает информацию о цветовом индексе или коэффициенте Ангстрема, что в рамках определенных допущений позволяет по этим значениям оценивать размеры частиц.

Мониторинг аэрозольного состава атмосферы с помощью аэрозольного зонда обратного рассеяния и наземного лидара позволяет реализовать всепогодные наблюдения. Приводятся данные одновременных лидарных наблюдений и шар-зондовых измерений. Обсуждаются поправки на монохроматичность и угол обратного рассеяния. Аэрозольный зонд обратного рассеяния может применяться как референсный прибор для отработки методики лидарных наблюдений и сравнения лидарных систем различной геолокации.

Многоволновой зонд обратного аэрозольного рассеяния позволяет перейти к определению микрофизических параметров аэрозольного наполнения с использованием существующего программного обеспечения, основанного на решении обратных задач. Представляется перспективным применение АЗОР на борту БПЛА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00057, <https://rscf.ru/project/23-27-00057>.

Влияние температурной стратификации нижнего километрового слоя воздуха над Москвой на приземное содержание загрязняющих примесей по измерениям на станции ИФА им. Обухова РАН в 2020–2023 гг.

Березина Е.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В., Артамонов А.Ю., Беликов И.Б., Белоусов В.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
e_berezina_83@mail.ru

Ключевые слова: *газовые примеси, мегаполис, приземный слой, профиль температуры, инверсия температуры, аэрозоли*

Проведён анализ влияния температурной стратификации в нижнем километровом слое городского воздуха на приземное содержание загрязняющих примесей: газов (CO , CO_2 , NO_x , CH_4 , O_3) и аэрозолей (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}) по данным измерений на станции ИФА им. Обухова РАН в центре г. Москвы в 2020–2023 гг. Вертикальные профили температуры в слое 0–1000 м, синхронные с данными измерений концентраций, получены с использованием микроволнового температурного профилемера (МТП-5). В зимние месяцы установлено преобладание (в 77% от времени наблюдений днем и 74% – ночью) продолжительных (от нескольких суток до месяца) приподнятых инверсий с нижней границей на высотах 250–450 м и мощностью 200–350 м. Существенных суточных вариаций высоты слоя перемешивания (H_{mix}) не наблюдалось, при этом наибольшая повторяемость значений H_{mix} приходится на интервал 350–400 м. Данная особенность проявляется в слабых суточных вариациях измерявшихся примесей ввиду стабильных условий накопления загрязнений от городских источников за длительный период. В летние месяцы инверсии температуры наблюдаются преимущественно в ночное время (23:00–05:00): примерно в 6% случаев – приземные и в 23% случаев – приподнятые. В связи с влиянием городского острова тепла в 96% случаев днём и 71% случаев ночью инверсии, как приземные, так и приподнятые, отсутствуют. В летние месяцы инверсии температуры способствуют росту концентраций загрязняющих примесей от городских источников в среднем в 1,5–2 раза. Установлен выраженный вклад зимних блокирующих антициклонов, зачастую сопровождающихся инверсиями оседания, в рост загрязняющих примесей. Проведены оценки средней скорости дневного и ночного накопления исследуемых примесей в условиях блокирующих антициклонов. Рост концентраций примесей (за сутки) составил 0,24–0,48 ppmv (CO), 16,8–125,8 ppmv (CO_2), 0,24–0,96 ppmv (CH_4), 4,8–38,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}), 9,6–43,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{PM}_{2.5}$) и 38,4–120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}), с наибольшими значениями в дневное время.

Интеграция химической транспортной модели и искусственной нейронной сети для повышения качества прогноза воздушных концентраций O_3 и PM_{10}

Борисов Д.В., Кузнецова И.Н.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

lbj23.98@mail.ru

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, гибридная модель, численный прогноз загрязнения воздуха, озон, взвешенные частицы, CHIMERE

В Гидрометцентре России рассчитываются прогнозы загрязнения воздуха в московском регионе по химической транспортной модели (ХТМ) CHIMERE с использованием прогнозов метеопараметров системы COSMO-Ru. Расчет концентраций загрязнителей проводится в узлах сетки с горизонтальным разрешением $2 * 2$ км с временным шагом 1 час на 48 часов вперед.

Для минимизации отклонений прогнозов ХТМ, выявленных по наземным измерениям на станциях “Мосэкомониторинга” в Москве, используются коррекция входных данных CHIMERE [1,2] или/и статистический постпроцессинг.

В докладе обсуждается предложенный инновационный подход к улучшению качества модельного прогноза – интеграция ХТМ и искусственной нейронной сети (ИНС). Целевой переменной прогноза ИНС заданы часовые измерения концентраций на станциях “Мосэкомониторинга” двух актуальных загрязнителей – приземный озон O_3 и взвешенные частицы PM_{10} . Обучающая выборка ИНС сформирована из часовых прогнозов концентраций ХТМ CHIMERE и прогнозов метеопараметров, влияющих на изменчивость концентраций, в узлах сетки, ближайших к измерительным станциям. Обучающая выборка охватывает 5-летний период февраль 2019 - февраль 2024 гг.

Проведены эксперименты по подбору конфигурации ИНС с тестированием на независимых выборках, включающих эпизоды повышенных концентраций O_3 и PM_{10} . Оптимальная конфигурация ИНС обеспечивает улучшение показателей качества прогнозов O_3 и PM_{10} , наиболее существенно в периоды, когда рост уровня загрязнения определяется локальными источниками и метеоусловиями. Вместе с тем ИНС не воспроизводит повышение аэрозольного загрязнения в эпизодах переноса почвенных частиц из удаленных районов, например, Прикаспия.

Результаты оценки рутинных прогнозов ИНС в период март-июль 2024 г. (независимая выборка) подтверждают эффективность предложенного подхода для повышения точности численных прогнозов концентраций O_3 и PM_{10} .

Литература:

1. Борисов Д.В., И.Ю. Шалыгина. Уточнение данных о землепользовании для расчетов эмиссий в химической транспортной модели CHIMERE на примере нижегородского региона. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. №3 (381), с.150-161.
2. Д.В. Борисов, И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев. Изменения кадастровых данных о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ в московском регионе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2 (388). С. 156-173.

Вертикальное распределение NO₂ в нижней тропосфере на Звенигородской научной станции: первые результаты измерений методом MAX-DOAS

Боровский А.Н., Постыляков О.В.

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

borovski@ifaran.ru

Ключевые слова: NO₂, двуокись азота, MAX-DOAS, нижняя тропосфера, пограничный слой, дистанционные измерения

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 [1]

В ИФА им. А.М. Обухова РАН реализован алгоритм решения задачи восстановления ВР NO₂ 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 NO₂.

Оба алгоритма используют модель переноса излучения [2] 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 неопределённость результатов восстановления ВР. Поэтому для отработки новых алгоритмов отобраны дни с благоприятными метеоусловиями, когда влияния этих параметров предполагаются минимальными. В докладе приводятся первые результаты восстановления вертикального распределения концентрации двуокиси азота для отобранных дней.

Литература:

1. Friess, U. et al. Intercomparison of MAX-DOAS vertical profile retrieval algorithms: studies using synthetic data, Atmos. Meas. Tech., 12, 2155–2181, <https://doi.org/10.5194/amt-12-2155-2019>, 2019.
2. О.В. Постыляков. Модель переноса радиации в сферической атмосфере с расчетом послынных воздушных масс и некоторые ее приложения. Известия РАН, ФАО, 2004, 40, №3, 314-329.

Возможности уточнения оценок эмиссий от лесных пожаров в Сибири по данным наземных наблюдений

Васильева А.В.¹, Моисеенко К.Б.¹, Скороход А.И.¹, Беликов И.Б.¹, Лаврова О.В.^{1,2}, Панкратова Н.В.¹

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

²Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Москва, Россия

vivechar@gmail.com

Ключевые слова: атмосферные эмиссии, горение биомассы, природные пожары, углеродный цикл, качество воздуха

Атмосферные выбросы от природных пожаров в бореальной зоне снижают качество воздуха и оказывают сравнимое с антропогенным влияние на климат Арктики. Активность лесных пожаров в Сибири в последние десятилетия растёт из-за изменений климата и антропогенного воздействия, при этом химический состав выбросов до сих пор мало изучен, а имеющиеся оценки суммарных выбросов углерода отличаются в разы (Матвеев, Барталев, 2023). В данной работе приводятся отношения концентраций метана (CH_4), чёрного углерода (BC) и оксидов азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) к концентрациям монооксида углерода (CO) в шлейфах лесных пожаров по архивным данным наземных измерений в разных районах Сибири, в частности на юго-востоке в экспедициях ТРОЙКА [1] и в центральной Сибири в обсерватории Зотино в экстремальный пожарный сезон 2012 г. Соотношения концентраций, оцененные по измерениям в шлейфе вблизи источника выброса, могут быть использованы для оценки эмиссионных соотношений и уточнения оценок эмиссий от лесных пожаров в зависимости от типа древесного топлива. По предварительным оценкам, отношения концентраций BC и CH_4 к CO в шлейфах пожаров в темнохвойных лесах оказались в 1.5 раза выше, чем в светлохвойных, как следует из визуального анализа спутниковых снимков шлейфов пожаров и обратных траекторий. Отношения концентраций NO_x к CO в разы ниже характерных средних значений для бореальных лесов. Далее планируется оценить средние эмиссионные соотношения на основе спутниковых карт преобладающих древесных пород, что поможет явно учесть один из факторов изменчивости в оценках региональных эмиссий. Также планируется включить в ряды наблюдений концентрации диоксида углерода (CO_2) для оценки выбросов каждого продукта горения при сжигании известного количества биомассы. Расчёты функций влияния по модели атмосферного переноса позволят оценить вклад в наблюдения отдельных пожаров и суммарный вклад за пожарный сезон, а также точнее оценить возраст дымовых шлейфов.

Литература:

1. Vasileva A., Moiseenko K., Skorokhod A., et al. Emission ratios of trace gases and particles for Siberian forest fires on the basis of mobile ground observation // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. PP. 12303–12325.

Аэрозольное загрязнение приземного воздуха вблизи Звенигорода и в Москве: когда пригород можно считать фоном

Виноградова А.А., Губанова Д.П., Иванова Ю.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
anvinograd@yandex.ru

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, PM_{10} , $PM_{2.5}$, массовая концентрация, метеорологические условия, Москва, Звенигород

Влияние крупных мегаполисов на окружающую среду прилежащих областей обычно оценивается по составу атмосферы в городе и пригороде [1], но сравниваемые показатели редко бывают получены синхронно и в течение длительного времени. Однако временная изменчивость изучаемых характеристик может быть значима. В данной работе анализируются результаты непрерывного мониторинга состава аэрозоля в приземном слое атмосферы, проводимого сотрудниками ИФА им. А.М. Обухова РАН в последние четыре года (2020-2023) синхронно на идентичных комплектах оборудования в Москве (далее ИФА) и вблизи Звенигорода (далее ЗНС, в 55 км к западу от Москвы) [2].

Рассматриваются величины среднесуточной массовой концентрации аэрозолей PM_{10} и $PM_{2.5}$ (далее – PM_{10} и $PM_{2.5}$), а также отдельные химических элементов. Из анализа исключены дни (не более 9% в год) с адвекцией пылевых и/или дымовых аэрозолей извне региона [2], искажающие типичный состав его приземного воздуха.

В докладе обсуждаются различия метеоусловий в Москве и Звенигороде за 2014-2023 годы, включая частоту ветров восточных направлений (со стороны города) в Звенигороде. Определены эмпирические зависимости и значения скорости изменения концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ и химических элементов от метеопараметров в разные сезоны в ИФА и ЗНС. В среднем (за 4 года наблюдений) PM_{10} и $PM_{2.5}$ выше в ИФА, чем в ЗНС на 70 и 30%, соответственно, отдельно в ЗНС при восточных ветрах – на $53 \pm 34\%$ и $47 \pm 5\%$ выше по сравнению с ветрами других направлений. Сезонные различия этого последнего показателя максимальны для грубой фракции частиц $PM_{10-2.5}$: от 15% летом до 120% весной. Поскольку в среднем за год восточные ветры в пригороде регистрируются при 10% стандартных наблюдений (от 6% весной до 14% осенью), преимущественное загрязнение воздуха в пригороде аэрозолями из города маловероятно. Обсуждается множество любопытных закономерностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 23-27-00063.

Литература:

1. Chubarova N.E. [et al.] Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model // Atmos. Chem. Phys. – 2022. – P. 10443–10466. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10443-2022>.
2. Губанова Д.П. [и др.] Условно-фоновый уровень аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве и пригороде: сезонные вариации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 59. – № 6. – С. 754-773. <https://doi.org/10.31857/S0002351523060056>.

Результаты измерений концентраций CO₂, CH₄, N₂O в приземном слое на ст. Обнинск в 1998 – 2023 годах

Вишератин К.Н., Устинов В.П., Шилкин А.В.

Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия

kvisher@rpatyphoon.ru

Ключевые слова: парниковые газы, CO₂, CH₄, N₂O, спектральный и вейвлетный анализ, длиннопериодные вариации и тренды

Постоянное увеличение концентраций основных парниковых газов – углекислого газа, метана, закиси азота, является достоверно установленным фактом. Для прогностических оценок влияния роста парниковых газов на изменения радиационного баланса и климата планеты необходим мониторинг тенденций в изменении газового состава атмосферы и анализ связей таких тенденций с естественными и антропогенными факторами.

Методы измерений содержания парниковых газов в атмосфере очень разнообразны. На мировой сети мониторинга GAW, насчитывающей сейчас более двух десятков станций, для измерений приземных концентраций применяется, как правило, специальное, прецизионное оборудование (газовые хроматографы и оптико-акустические газоанализаторы и др.) с эталонными газовыми смесями, обеспечивающими высокую точность единичного измерения пробы воздуха.

В настоящей работе представлены результаты многолетних измерений в приземном слое атмосферы на ст. Обнинск концентраций углекислого газа, метана, закиси азота в пробах воздуха, полученные методом спектрального анализа. Концентрация газов в пробах воздуха определялась с помощью инфракрасных Фурье-спектрометров с различным разрешением и оптической многоходовой кюветы.

Представлены результаты анализа спектральной структуры вариаций парниковых газов методами модифицированного и классического Фурье-анализа и вейвлетного преобразований. Определены параметры длиннопериодных вариаций и трендов и построены полужемпирические модели вариаций углекислого газа, метана, закиси азота.

Эмиссия метана из термокарстовых озер южной тундры Западной Сибири

Гаврилов Г.О., Усачева А.А., Казанцев В.С., Ларина А.В., Тышова Е.А., Белов А.Е.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
joe.gavrilov@gmail.com

Ключевые слова: метан, эмиссия, парниковые газы, термокарстовые озера, тундра, Западная Сибирь

Измерения удельных потоков метана (УПМ) проводились на двух термокарстовых озерах в подзоне южной тундры Западной Сибири (67°22'23.3"с.ш., 78°37'37.4"в.д.) в конце июля 2024 г. На каждом из озер были выбраны по две точки наблюдений – в прибрежной и в центральной зонах, на каждой точке были установлены по две плавающие камеры с щитами, препятствующим попаданию пузырьков метана в камеру и по две – без щитов. Измерения УПМ проводились на каждой точке через 3 часа. Параметры среды фиксировали с помощью метеостанции «Kestrel 5000» и термодатчиков «Thermochron iButton». Пробы газа отбирали во флаконы, заполненные раствором NaCl. Концентрации CH₄ определяли на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2».

Суточные вариации УПМ в основном контролировались изменениями скорости ветра (оз. Ледяное, $R^2=0,55$, $n=52$), (оз. Венера, камеры без щитов $R^2=0,49$, $n=32$), максимальные потоки были в точках с максимальной ветровой активностью – в центре оз. Венера и прибрежной части на оз. Ледяное. УПМ на оз. Венера также хорошо согласовывались с температурой поверхности вод озера ($R^2=0,65$, $n=32$).

Различия между УПМ, измеренных в прибрежной зоне обоих озер, хорошо объясняются различиями в ветровых условиях ($R^2=0,68$, $n=60$). Однако по результатам статистических тестов при различиях скорости ветра почти в два раза на оз. Венера, различия в УПМ, измеренных в центре и около берега, оказались незначимы ($p=0,27$, paired t-test, $n=32$), в то же время на оз. Ледяное – значимыми ($p<0,001$, paired t-test, $n=24$), при не столь заметных различиях в ветровых условиях.

УПМ, измеренные на оз. Ледяное, превышали потоки с оз. Венера, даже при равных скоростях ветра в центральных частях, что скорее всего связано с более высокими температурами поверхности вод и донных отложений, обусловленных криолитологическими особенностями оз. Ледяное.

Работа выполнена в рамках темы ГЗ ИФА РАН № 1022030400001-9 «Мониторинг и анализ динамики эмиссии парниковых газов из наземных и пресноводных экосистем Арктической зоны России».

Физико-химические характеристики аридного аэрозоля Прикаспия и Приаралья как удаленных источников атмосферной пыли в центральных и северных районах европейской России

Губанова Д.П.¹, Чхетиани О.Г.¹, Кудерина Т.М.², Иорданский М.А.¹, Обвинцев Ю.И.¹,

Артамонова М.С.¹, Максименков Л.О.¹

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

²Институт географии РАН, Москва, Россия

gubanova@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосфера, почва, аридный аэрозоль, элементный состав, распределение по размерам, массовая концентрация, Южное Приаралье, Калмыкия

Исследования свойств минеральных аэрозолей в зонах современного опустынивания важны и актуальны для понимания процессов влияния засушливых и пустынных регионов на биосферу, атмосферу и климат Земли. Аридные и семиаридные территории юга Европейской части России (ЕЧР), Прикаспия и Приаралья являются источниками минеральной пыли [1-3], оказывающими воздействие на ЕЧР. В последние годы стали чаще регистрироваться явления дальнего переноса атмосферной пыли из Арало-Каспийского региона в умеренную и высокоширотную зоны ЕЧР [4-6]. Образование пустыни Аралкум способствовало возникновению нового интенсивного источника солепылевых частиц: количество пыли в Средней Азии за счет эмиссии с поверхности Аралкума в среднем ежегодно увеличивается на 7 % [3].

Работа связана с анализом данных экспериментальных исследований состава приземных аэрозолей и почв ландшафтов в Южном Приаралье (пос. Муйнак, Каракалпакстан, Узбекистан) и в Северо-Западном Прикаспии (Черноземельский р-н, Калмыкия). Выявлены различия ландшафтов Южного Приаралья и Калмыкии по минералогическому и химическому составу почв, обусловленные их литолого-генетическими особенностями. Процентное массовое содержание большинства химических элементов в аэрозолях Южного Приаралья на порядок или больше превышает этот показатель для тех же элементов в аэрозолях Калмыкии. Изучаемые приземные аэрозоли сильно обогащены тяжелыми металлами, S и Sn, источниками которых являются не только региональные техногенные факторы, но и почвы типичных ландшафтов. Установлены распределения счетной и массовой концентрации по размерам аэрозольных частиц, что необходимо при моделировании дальнего переноса и изменения состава пылевого аэрозоля из рассматриваемых регионов.

Многолетние (2007-2022 гг.) наблюдения в Калмыкии позволили установить основные различия в изменчивости массы частиц атмосферной пыли и отдельных химических элементов и в их составе, а также обуславливающие их факторы.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 20-17-00214-П).

Литература:

1. Глушко А.Я. [и др.] // Юг России: экология, развитие. – 2010. – № 1. – С. 146-151.
2. Zhang X.-X. [et al.] // Atm. Environ. – 2020. – V. 238. –117734.
3. Banks J.R. [et al.] // J. Geophys. Res. Atmospheres. – 2022. – V.127. – N 21. – e2022JD036618.
4. Шевченко В.П. [и др.] // ДАН. – 2010. – Т. 431. – № 5. – С. 675-679.
5. Виноградова А.А. [и др.] // Оптика атмосф. и океана. 2024. – Т. 37. – № 6 (425). С. 453-460.
6. Gubanova D. [et al.] // AIMS Geosciences. – 2022. V. 8. – N 2. – P. 277-302.

Различия в отклике потоков CO₂ на аномальные погодные условия в тропических, умеренных и полярных широтах

Гущина Д.Ю.¹, Тарасова М.А.¹, Горбаренко Е.М.^{1,2}, Железнова И.В.¹, Емельянова Е.Р.^{1,2},

Гибадуллин Р.Р.¹, Ольчев А.В.¹¹

¹*Кафедра метеорологии и климатологии, Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Лаборатория эколого-климатических исследований, Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*

dasha155@mail.ru

Ключевые слова: потоки CO₂, экстремальные температуры и осадки, пульсационные измерения, FLUXNET, полярные, умеренные, тропические широты

На базе данных реанализа и сети FLUXNET исследовано воздействие экстремальных температур и осадков на изменчивость потоков CO₂ в различных экосистемах тропических, умеренных и полярных широт за теплый период. Показано, что в полярной и умеренной зоне во всех исследованных экосистемах наиболее неблагоприятным условием для фотосинтеза являются экстремально высокие температуры и осадки, которые сопровождаются усиленной эмиссией CO₂ в атмосферу. Высокие температуры приводят к ослаблению фотосинтеза и уменьшению первичной продукции в экосистемах. Наиболее сильное воздействие оказывают интенсивные осадки, которые приводят к ускоренному разложению органической материи и усиленному дыханию почвы, что вызывает увеличение эмиссии CO₂. В тропиках отмечается аналогичная реакция экосистем на обильные осадки – усиленная эмиссия CO₂ во всех биомх за исключением саванн, которая является результатом тех же процессов, что и во внетропических широтах. При этом отклик потоков CO₂ на аномально высокие температуры в тропиках противоположен отклику в умеренных широтах и проявляется в усилении поглощения углекислого газа экосистемой в период жары. Этот результат существенно отличается от известных ранее зависимостей (увеличение эмиссии при жаркой и сухой погоде и поглощения – при холодных и влажных условиях). Он обусловлен тем, что при достаточном увлажнении почвы аномально высокие температуры не являются лимитирующим фактором для нормального функционирования растений. Кроме того, аномально высокие температуры, как правило, наблюдаются при ясной погоде, когда интенсивный приток солнечной радиации способствует активизации фотосинтеза. Отклик потоков CO₂ на понижение температуры весьма неоднозначен даже в пределах одного биомх, что прослеживается во всех широтных поясах. Ключевым различием в отклике потоков CO₂ на погодные экстремумы является доминирующее влияние аномальных осадков в тропиках и температурных аномалий в умеренных и полярных широтах. Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 22-17-00073.

Влияние естественных тропических осцилляций на содержание озона и меридиональную циркуляцию в зимней стратосфере

Ермакова Т.С.^{1,2}, Коваль А.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

taalika@mail.ru

Ключевые слова: стратосферный озон, остаточная меридиональная циркуляция, Эль-Ниньо Южная осцилляция, квазидвухлетнее колебание

Озон в основном образуется в тропической стратосфере, поскольку солнечная инсоляция там самая высокая, она необходима для реакций фотодиссоциации. Атмосферная меридиональная циркуляция перераспределяет озон в средние и высокие широты, где он опускается и накапливается в стратосфере. Исследования изменчивости озона и ее связи со средней меридиональной циркуляцией в стратосфере в обоих полушариях в разные месяцы показывает, что слабая меридиональная циркуляция при низкой температуре полярной стратосферы приводит к истощению полярного озона. Поскольку процесс развития стратосферного полярного вихря не одинаков каждую осень, изменчивость озона в начале января может быть связана с термодинамической ситуацией в стратосфере. В работе изучена зависимость содержания озона в полярной стратосфере от различных фаз квазидвухлетнего колебания (КДК) зонального ветра и Эль-Ниньо–Южного колебания (ЭНЮК) в зимний период. Среднемесячная (с ноября по январь) остаточная меридиональная циркуляция (ОМЦ) рассчитана для четырех различных комбинаций основных фаз ЭНЮК и КДК с использованием данных реанализа MERRA2. Показано, что фаза КДК проявляется в различном вертикальном распределении озона в экваториальной стратосфере, а также в усилении/ослаблении вторичной меридиональной циркуляции в тропиках. Усиление ОМЦ от тропической к полярной стратосфере сильнее на высотах, где в тропиках больше озона в условиях Эль-Ниньо. Усиление ОМЦ наблюдается из районов с истощенным озоном в условиях Ла-Нинья. К февралю в условиях Ла-Нинья и восточного КДК наблюдается «накопительный» эффект, который выражается в самом низком содержании озона в полярной стратосфере. Численные эксперименты, проведенные с использованием Модели средней и верхней атмосферы (МУАМ), подтвердили тенденции изменения меридионального переноса, выявленные с использованием данных реанализа MERRA2.

Особенности загрязнения воздуха приземным озоном в Красноярске в 2023 году, обусловленное метеоусловиями и концентрациями других загрязняющих веществ

Загайнова М.С.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

marika0409@bk.ru

Ключевые слова: приземный озон, загрязняющие вещества, метеорологические параметры, Красноярск

Приземный озон является опасным загрязняющим веществом, оказывающий негативное воздействие на здоровье человека и растительность, отнесен к 1 классу опасности.

Озон является вторичным загрязнителем, образующимся в атмосфере вследствие сложных фотохимических реакций между его предшественниками, включая промышленные и автомобильные выбросы оксидов азота (NO_x) и летучих органических соединений (ЛОС) под воздействием солнечного света. Скорость его образования зависит от уровня загрязнения воздуха предшественниками и соотношения NO_x и ЛОС [1].

В рамках данного исследования были проанализированы концентрации приземного озона в Красноярске в 2023 году на трех пунктах наблюдений: один в пригороде с западной стороны города (метеостанция), второй в центре города и третий в восточной части города. Среднегодовые концентрации озона на данных пунктах существенно различались: в пригороде она составляла 1,7 ПДКс.г., в восточной части города – 1,2 ПДКс.г., а в центре – всего 0,7 ПДКс.г.

Были оценены сезонно-суточные колебания концентраций озона и проанализирована взаимосвязь концентраций озона, оксидов азота, оксида углерода и метеорологических параметров на всех пунктах. Получены высокие положительные коэффициенты корреляции между концентрациями озона и температурой воздуха, особенно в летний период. Взаимосвязь концентраций озона с СО и NO_x нелинейна, с максимальными отрицательными корреляциями, выявленными в весенний и летний периоды для пригородной и восточной станций. В центре города, где концентрации веществ-предшественников наибольшие, образование озона в атмосфере было ограничено даже при благоприятных метеоусловиях. Для станций, расположенных в городе, выявлено проявление эффекта выходного дня, описанного в ряде исследований [2].

Литература:

1. P. S. Monks. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer // Atmos. Chem. Phys. 2015. 15, P. 8889–8973.
2. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Изменчивость концентраций основных загрязнителей в воздухе Лондона // Оптика атмосферы и океана. 2014. 27, № 5. С. 424-434.

Долговременные тренды общего содержания монооксида углерода в атмосфере Московского мегаполиса и их связь с метеорологическими условиями

Кириллова Н.С., Ракитин В.С., Джола А.В., Федорова Е.И., Еланский Н.Ф.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
n.kirillova65@gmail.com

Ключевые слова: атмосферная спектроскопия, мегаполис, монооксид углерода, долговременные тренды

Представлены результаты комплексного анализа долговременных спектроскопических данных общего содержания монооксида углерода (ОС СО) на станциях Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН), в Москве и Московской области (Звенигородская научная станция – ЗНС). Исследованы долговременные вариации ОС СО и метеорологические параметры в пограничном слое атмосферы (ПСА). Обнаружено снижение среднегодовых значений общего содержания окиси углерода в 2000–2023 г. для Москвы ($-2.23 \pm 0.36\%$ /год) и ЗНС ($-1.12 \pm 0.33\%$ /год). Дополнительно обсуждаются характеристики трендов СО на обеих станциях в разные сезоны и периоды. К анализу были привлечены данные аэрологического зондирования о скорости ветра.

В разные сезоны и периоды оценки тренда содержания СО существенно отличаются. После 2008 г. темпы спада ОС СО снизились на обоих пунктах. В период 2000–2009 гг. ОС СО убывало со скоростью (-2.12% /год в Москве и -1.59% /год на ЗНС), а в 2009–2023 гг. было получено -1.78% /год для Москвы и -0.78% /год для ЗНС, соответственно (приводятся оценки на основе среднегодовых значений). В летние и осенние месяцы на ЗНС в 2009–2023 г. значимых изменений ОС СО не было обнаружено ($0.04 \pm 0.92\%$ /год).

Установлено, что по данным аэрологического зондирования увеличение скорости ветра в ПСА Москвы в 2003–2020 гг. составило $0.88 \pm 0.39\%$ /год (по среднегодовым величинам). В то же время в Калужской области статистически значимых изменений скорости ветра не было обнаружено ($0.06 \pm 0.39\%$ /год). Полученные результаты (оценки трендов ОС СО и скорости ветра) указывают не только на сокращение антропогенных эмиссий Москвы, но и на влияние климатического (метеорологического) фактора на качество воздуха в Москве.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-17-00200.

Учет аэрозольного эффекта в численных экспериментах с использованием системы COSMO-Ru-ART

Кирсанов А.А.^{1,2}, Чубарова Н.Е.^{1,3}, Варенцов М.И.^{1,2,3}, Ривин Г.С.^{1,3}, Ольчев А.В.³

¹Гидрометцентр России, Москва, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

heu3becteh@mail.ru

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, химико-транспортные модели, численный прогноз погоды

С использованием модели COSMO-ART (COnsortium for Small-scale MOdeling – Aerosols and Reactive Trace gases) проведены эксперименты по моделированию процессов переноса и трансформации городского аэрозоля и дымового аэрозоля при природных пожарах.

Учитывалось влияние городского аэрозоля на радиационные потоки в атмосфере и на температурные характеристики. Помимо эффекта городского аэрозоля, влияние мегаполиса на атмосферные процессы учитывалось с использованием параметризации городской подстилающей поверхности TERRA_URB.

Эксперименты показали, что аэрозольный эффект приводит к снижению температуры воздуха на уровне 2 м как при слабо поглощающем аэрозоле, так и при повышенной доле черного углерода. Город значительно влияет на приземные концентрации аэрозоля, но его влияние на Аэрозольную Оптическую Толщину не определяющее. Первые эксперименты по учету влияния городского аэрозоля на осадки показали ослабление менее интенсивных осадков, а также усиление осадков с наибольшей интенсивностью.

Дымовой аэрозоль при интенсивных лесных пожарах имеет значительно большие концентрации, сильно сокращает приходящую на земную поверхность коротковолновую солнечную радиацию, в том числе поглощая ее в приподнятых слоях атмосферы и изменяя вертикальный профиль температуры.

Численные эксперименты выявили значительное влияние лесных пожаров на погодные условия, даже на удалении от непосредственных очагов возгорания. В то время как повреждение растительности приводило к повышению приземной температуры, уменьшение приходящей коротковолновой радиации дымовым аэрозолем снижало приземную температуру и повышало температуру приподнятых слоев, приводя к более устойчивой стратификации атмосферы.

Исследование проведено в рамках Научно-исследовательской работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Анализ влияния города на атмосферные процессы проведен при поддержке Российского Научного фонда, проект №23-77-30008.

Характеристики стратосферного аэрозоля природных пожаров по данным лидарных измерений в г. Обнинск с 2012 по 2023 гг.

Коршунов В.А.

Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия

korshunov@rpatyphoon.ru

Ключевые слова: *стратосферный аэрозоль, лидарное зондирование, аэрозоль природных пожаров*

Аэрозоль природных пожаров (АПП) проникает в стратосферу и в отдельных эпизодах по своим оптическим и радиационным параметрам сравним с аэрозолем вулканических извержений средней мощности. В то же время он постоянно присутствует в виде некоторой фоновой (сажевой) фракции наряду с серноокислотным аэрозолем (СА). В докладе представлены данные лидарных измерений на длинах волн 355 и 532 нм, по результатам которых проведена оценка оптических параметров обратного рассеяния, ослабления и поглощения фоновой фракции АПП.

Анализ литературных данных показывает, что АПП в стратосфере присутствует в виде так называемой коричневой сажи BrC. Характерной особенностью BrC аэрозоля является резкий рост поглощения в ультрафиолетовой области спектра, что делает возможным определение его оптических характеристик с использованием одной из длин волн зондирования в ультрафиолетовой области. Для обработки данных зондирования разработан итерационный алгоритм совместного решения лидарных уравнений на длинах волн 355 и 532 нм. Априори задаются высотные профили лидарных отношений и отношений коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 355 и 532 для АПП и СА. В результате находятся высотные профили коэффициентов обратного рассеяния для обоих типов аэрозоля. На основе принятой модели определяются также коэффициенты ослабления и поглощения АПП и СА.

В среднем для периода 2012 – 2023 гг. получено, что АПП располагается в высотном слое от 12 до 20 км. В максимуме слоя 12 – 15 км обратное рассеяние АПП составляет 32% от суммы АПП+СА на длине волны 355 нм и 22 % на длине волны 532 нм. Оптическая толщина АПП в слое 10–30 км составляет 0,011 и 0,0013 по ослаблению на длинах волн 355 и 532 нм и $6,3 \cdot 10^{-3}$ и $3,0 \cdot 10^{-4}$ по поглощению на тех же длинах волн. Относительный вклад АПП в суммарную аэрозольную оптическую толщину слоя 10 – 30 км составляет 32% и 9% на длинах волн 355 и 532 нм.

Эмиссия метана и углекислого газа в местах выхода на поверхность подземных вод Центральной Якутии

Кривенок Л.А.¹, Тананаев Н.И.^{2,3,4}, Баишев Н.Е.^{2,3}

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

²Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

⁴Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

krivenok@ifaran.ru

Ключевые слова: парниковые газы, пресноводные экосистемы, углерод

Подземные воды являются значимым источником поступления метана в атмосферу [1]. Потоки CH_4 и CO_2 , ассоциированные с источниками подземных вод в криолитозоне – слабоизученный компонент глобального цикла углерода. Полевые работы 2021–2023 гг. проводились в Центральной Якутии в правобережной части долины среднего течения р. Лена на трех крупных постоянно действующих источниках подземных вод, образующих наледи (ист. Булуус, Улахан-Тарын, Суллар). Удельные потоки определялись методом закрытых плавающих камер, концентрации растворенного метана в воде – методом парофазной экстракции. Поступление парниковых газов в атмосферу происходит как путем прямой эмиссии через грифоны, так и через дегазацию разгружающихся вод. Средний удельный поток метана из ист. Суллар в 2021, 2022 и 2023 гг. соответственно составил 38.9, 233.9 и 329.5 $\text{мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$, углекислого газа – 36.0, 102.6 и 185.1 $\text{мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$. На ист. Булуус наблюдалась эмиссия углекислого газа (от 23.7 до 99.0 $\text{мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$), а для метана удельные потоки варьировали от околонулевых до 6.1 $\text{мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$. Удельные потоки между отдельными выходами ист. Улахан-Тарын отличались незначимо, среднее значение для источника составило 171.8 $\text{мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ для метана и 56.8 $\text{мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ для углекислого газа. Измеренные в 2023 г. значения $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ в газовой фазе после дегазации воды ист. Улахан-Тарын и Суллар составили -85.4 ± 0.9 и -72.9 ± 1.0 ‰ соответственно и примерно попадают в диапазон, характерный для CH_4 биогенного происхождения [2]. Таким образом, в пределах Центральной Якутии впервые измерены высокие удельные потоки метана и углекислого газа, ассоциированные с источниками подземных вод (в разы превышающие измеренные нами ранее диффузионные удельные потоки из пресноводных озер, расположенных на правом борту р. Лены). Исследование выполнено в рамках НИОКТР 122012400106–7, госзадания ИФА РАН № 1022030400001-9.

Литература:

1. Гарькуша Д.Н. Метан в подземных водах: образование, распределение, миграция и влияние добычи газа по технологии гидроразрыва пласта. Астраханский вестник экологического образования. 2021. №2(62). С. 72–88.
2. Whiticar M. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. Chemical Geology. 1999. V. 161. P. 291–314.

Химическое равновесие ночных ОН и HO_2 на высотах мезосферы – нижней термосферы

Куликов М.Ю., Беликович М.В., Чубаров А.Г., Дементьева С.О., Фейгин А.М.
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
kulm@ipfran.ru

Ключевые слова: мезосфера, нижняя термосфера, мезопауза, химические процессы

На высотах мезосферы – нижней термосферы (МНТ) ОН и HO_2 играют существенную роль во многих физико-химических процессах, в частности, участвуют в химическом нагреве воздуха, формировании атмосферных свечений, каталитических циклах разрушения озона. Поэтому мониторинг пространственно-временной эволюции ОН и HO_2 совместно с другими химически активными примесями является одной из важнейших задач в этой области атмосферы, где прямые измерения затруднены. В работе [1] проведено исследование ночного химического равновесия ОН и HO_2 с использованием трехмерного моделирования в рамках общего подхода, включающего в себя идентификацию основных источников и стоков в пространственно-временных областях равновесия этих компонент и вывод аналитических критериев выполнения этого равновесия. Представленный анализ показывает, что существуют протяженные области, где ночные HO_2 и ОН близки к своим локальным равновесным концентрациям, которые определяются в основном реакциями компонент семейств HO_x – O_x между собой и с H_2O_2 , N, NO, NO_2 и CO. Выше 70 км равновесные выражения для ОН и HO_2 могут быть заметно сокращены и включать только процессы с участием HO_x – O_x компонент. Показано, что укороченные условия хорошо описывают равновесия HO_2 и ОН от верхней точки области моделирования (130 км) до некоторых границ, высотные положения которых варьируются в интервале от 72-73 до 85 км и существенно зависят от сезона и широты. Разработанные аналитические критерии почти везде хорошо воспроизводят пространственно-временную изменчивость этих границ. Ввиду слабой чувствительности к неопределенностям скоростей реакций и других параметров, эти критерии можно считать надежным инструментом для проверки равновесия HO_2 и ОН по данным измерений. Полученные результаты позволяют расширить ранее предложенные методы восстановления плохо измеряемых компонент МНТ по данным измерений и разрабатывать новые подходы.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-12-00064.

Литература:

1. Kulikov M. Yu., Belikovitch M. V., Chubarov A. G., Dementyeva S. O., Feigin A. M. Technical note: Nighttime OH and HO_2 chemical equilibria in the mesosphere–lower thermosphere // Atmospheric Chemistry and Physics, 24, 10965–10983, <https://doi.org/10.5194/acp-24-10965-2024>, 2024.

Суточная динамика и межгодовые различия эмиссии метана южнотундровыми полигональными торфяниками

Ларина А.В.^{1,2}, Гаврилов Г.О.¹, Казанцев В.С.¹, Кривенко Л.А.¹

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

²Факультет почвоведения, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

larin.arina2003@gmail.com

Ключевые слова: парниковые газы, метан, болотные ландшафты, полигональные болотные комплексы

Полигональные торфяники, распространённые в южнотундровой подзоне Западной Сибири, способны при деградации становиться потенциальными источниками CH_4 . Исследование посвящено оценке эмиссии метана с поверхности полигонального торфяника. Летом 2023 и 2024 года было произведено изучение удельных потоков метана (УПМ) в тёплый период суток (с 12 до 18 часов) и суточной динамики УПМ на деградированном полигональном торфянике. Объект исследования расположен в междуречье рек Таз и Пур в 10 км к ЮЮЗ от п. Тазовский. Измерение велось на останцах полигонов и мочажинах, чьи площади составляют около 45% и 55%, соответственно.

Определение величины УПМ осуществлялось методом статических камер (Глаголев и др., 2010), длительность экспозиции составила 30–45 минут.

Получено 102 значения УПМ, из которых 30 приходится на дневные измерения мочажин, 56 на измерение суточной динамики и 16 величин УПМ получено на останце полигона. Суточная динамика была выявлена на более обводненной мочажине, где средняя величина УПМ тёплого периода на 8–17% превышала среднесуточную.

Межгодовое различие УПМ на точках определялось разницей погодных условий, так максимальная температура воздуха во время измерений в 2023 и 2024 годах, достигала 28°C и 14.5°C, соответственно. Также отличались глубины сезонноталого слоя и стояния болотных вод. Медианы УПМ снизились в 2024 году на 17% и 28%: для необводненной мочажины с 1.3 до 1.0 $\text{mgCH}_4\text{m}^{-2}\text{ч}^{-1}$, для обводненной с 4.6 до 3.6 $\text{mgCH}_4\text{m}^{-2}\text{ч}^{-1}$. Измерение на останце полигона, проведенное летом 2023 года, показало околонулевые величины УПМ.

Анализ Спирмена показал коэффициенты корреляции УПМ с температурой воздуха (0.30 и 0.50) и давлением (0.03 и -0.41) для необводненной и обводненной мочажин, соответственно. Это подтверждает предположение об увеличении УПМ при росте температуры.

Факторы сезонной и суточной динамики определяют величину УПМ, что необходимо учитывать при проведении площадных оценок эмиссии.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФА РАН 1022030400001-9.

Литература:

1. Глаголев М. В., Сабреков А. Ф., Казанцев В. С. Измерение газообмена на границе почва/атмосфера. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2010. – 96 с.: табл. 4, ил. 20, библи. 70.

Грозы в Москве и их влияние на состав приземного воздуха

Локощенко М.А.¹, Еланский Н.Ф.², Богданович А.Ю.^{1,3}, Алексеева Л.И.¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт глобального климата и экологии имени Ю.А. Израэля, Москва, Россия

loko@geogr.msu.ru

Ключевые слова: грозы, продолжительность, повторяемость, многолетние изменения, профили ветра, стратификация, содар, состав воздуха, озон, окислы азота

Исследованы грозы по данным Метеорологической обсерватории МГУ за последние 70 лет. В среднем за год в Москве наблюдается 26 грозовых дней (от 13 до 45 в разные годы) и 37 отдельных гроз (от 15 в 2002 г. до 71 в 2013 г.). Средняя продолжительность одной грозы составляет 49 мин, общая продолжительность гроз за год – в среднем 30 ч. Рекордно долгая гроза в Москве 18 июля 1957 г. продолжалась 10 ч 40 мин. В годовом ходе грозы чаще наблюдаются с мая по август. Наибольшая их повторяемость приходится на июль (7,6 грозовых дней), наименьшая – на январь (0,03, то есть всего 2 грозы за 70 лет). Суточный ход повторяемости гроз отмечен максимумом после полудня и вечером. Несмотря на потепление климата, многолетние изменения числа дней с грозами и числа гроз в Москве статистически незначимы, а продолжительность гроз даже сократилась.

С грозами связано усиление ветра как следствие развития мощных кучево-дождевых облаков. По данным доплеровского содара MODOS, в среднем в течение 40-50 мин после начала грозы отмечается статистически достоверное увеличение скорости ветра в слое от 40 до 200 м.

Исследованы возможные изменения состава воздуха во время гроз на высоте 4 м по данным Экологической станции ИФА РАН и МГУ за период 2002-2014 гг. К возможным причинам изменений приземного озона при грозах относятся: химические реакции в лидере молнии; усиление вертикального перемешивания в облаках Сб и притока озона к поверхности из свободной тропосферы; изменение фонового содержания O_3 в разных воздушных массах при фронтальных грозах. Однако достоверных изменений приземного содержания O_3 , NO и NO_2 не выявлено. Отмечен небольшой рост озона в продолжение первых 30 мин после начала грозы в среднем по отдельной выборке особо сильных гроз, однако он статистически не значимый. Очевидная причина отсутствия достоверных изменений состава приземного воздуха – значительное удаление большинства грозовых очагов от места измерений. Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 23-27-00279.

Влияние вулкана Хунга Тонга – Хунга Хаапай на содержание озона в стратосферном вихре Антарктики и Арктики в 2023 г. и 2024 г.

Лукьянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А.

Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия

lukyanov@caomsk.mipt.ru

Ключевые слова: *стратосферный полярный вихрь, водяной пар, озон, траектория воздушных масс*

В результате извержения подводного вулкана Хунга Тонга – Хунга Хаапай (20.54° ю.ш., 178.3° з.д.) 15 января 2022 г. впервые за всю эпоху спутниковых наблюдений существенно увеличилось содержание стратосферного водяного пара, влияющего на радиационный баланс атмосферы, а также её состав, включая озон. В частности, в зимнем стратосферном полярном вихре увеличение концентрации водяного пара может привести к увеличению температуры образования и площади поверхности полярных стратосферных облаков (ПСО), и, как следствие, более сильному разрушению озона. На основе данных реанализа M2SCREAM [1] проведены расчёты вариаций озона и озonoактивных компонентов по ансамблю траекторий внутри полярного вихря на высотах 18 – 20 км зимой 2023 г. как в Антарктике, так и в Арктике зимой 2023/2024 г. в условиях повышенного содержания водяного пара. Для сравнения использовались результаты аналогичных расчётов для 2020 г., когда и в обоих полушариях внутри вихря наблюдались рекордные потери озона. Результаты расчётов показали, что потери озона в Антарктике в 2023 г. не увеличились по сравнению с аналогичной зимой 2020 г. Одной из возможных причин могло быть удаление избытка водяного пара за счёт конденсации и последующей седиментации крупных ледяных частиц, образовавшихся в начале зимы. Кроме того в антарктическом полярном вихре для рассматриваемых зим хлорные резервуары практически полностью трансформировались в активную форму, и увеличение площади поверхности ПСО не привело бы к дополнительному освобождению активных галогенов и увеличению разрушения озона. В Арктике в начале зимы 2023/2024 г. также наблюдалось повышенное содержание водяного пара, но это не привело к существенным потерям озона из-за раннего внезапного стратосферного потепления в конце декабря 2023 г. и сохранившейся теплой стратосфере до конца зимнего сезона. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00230

Литература:

1. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2022), M2-SCREAM: 3d,3-Hourly,Instantaneous,Model-Level,Assimilation,Assimilated Constituent Fields, Replayed MERRA-2 Meteorological Fields, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 10.5067/7PPR3XRD6Q3NQ

Сопоставление наблюдаемых приземных концентраций ЛОС в Московском регионе с данными прогноза транспортно-химической модели SILAM

Людюкин В.С.^{1,2}, Беликов И.Б.¹, Белоусов В.А.¹, Ракитин В.С.¹

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

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

lyulyukin@ifaran.ru

Ключевые слова: численное моделирование, перенос примесей, летучие органические соединения, протонный масс-спектрометр, сезонно-суточные вариации, SILAM

Летучие органические соединения (ЛОС), присутствующие в приземном воздухе, оказывают существенное влияние на глобальные изменения климата Земли. В частности, химические реакции ЛОС с иными загрязняющими атмосферу примесями под воздействием солнечного излучения приводят в итоге к интенсивной генерации озона [1]. Было проведено качественное и количественное сопоставление измеряемых приземных концентраций ЛОС с данными прогноза модели SILAM.

Данные о концентрациях ЛОС получены с помощью протонного масс-спектрометра модели Compaq PTR-MS. Использовались данные, полученные для нескольких среднесрочных периодов с 2022 по 2024 год на Звенигородской научной станции (ЗНС) (Московская обл., дер. Новошихово) [2]. ЗНС расположена в районе редкой сельской застройки, удаленном от крупных транспортных магистралей. Прогноз приземных концентраций ЛОС рассчитывался ежедневно на основе численного программного комплекса SILAM. Для метеорологических данных использовались прогнозы модели ICON, для граничных условий использовались данные европейских прогнозов SILAM. Эмиссии были заданы с помощью инвентаризационных данных CAMS-REG-AP.

Для сопоставления были отобраны 7 компонентов ЛОС. Были получены значительные ошибки в прогнозе средних значений концентраций сторону меньших значений для ацетальдегида, этанола и уксусная кислота, до двух порядков. Сравнительно точные оценки средних значений были получены для бензола, толуола и ксилолов. Характерные особенности временного хода концентраций примесей, в целом, хорошо воспроизводятся моделью, за исключением этанола и изопрена. Модель хорошо воспроизводит суточный ход бензола, толуола и ксилола: пик концентрации в 7 часов утра и минимум значений с 10 до 20 часов, коэффициент корреляции для этих трех компонентов превышает 0.7. Результаты сопоставления указывают на значительные ошибки в параметрах источников эмиссий инвентаризации в сторону занижения значений.

Работы выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда №20-17-00200.

Литература:

1. Berezina E. V. et. al. Impact of VOCs and NOx on Ozone Formation in Moscow // Atmosphere. - 2020. - V. 11. - №. 1262. - DOI 10.3390/atmos11111262.
2. Белоусов В.А. Наблюдения климатически значимых летучих органических соединений в приземном воздухе протонным масс-спектрометром // Международная конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023». 9–13 октября 2023 года. Сборник тезисов докладов. — М.: Физмат-книга, 2023.

Исследование тенденций загрязнения атмосферы вследствие дальнего переноса в регионе Кавказские Минеральные Воды в 1980-2050 гг. в условиях изменяющегося климата

Матешева А.В.^{1,2}, Макошко А.А.^{1,2,3}

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

²Российский университет транспорта, Москва, Россия

³Российская академия наук, Москва, Россия

matesheva@ifaran.ru

Ключевые слова: загрязнением атмосферы, перенос примесей, дальний перенос, изменение климата

Исследованы тенденции дальнего загрязнения атмосферы в курортном регионе федерального значения Кавказские Минеральные Воды (КМВ) за период 1980-2050 гг. на основе изучения динамики направлений дальнего переноса примесей. В ходе исследования выполнены расчеты введенного ранее авторами индекса загрязнения атмосферы, основанного на решении сопряженной задачи переноса и диффузии примеси и характеризующего особенности динамики дальнего загрязнения региона КМВ за рассматриваемый период с учетом изменения климата по двум базовым сценариям проекта CMIP6 (IPCC) – SSP2-4.5 и SSP5-8.5.

Результаты расчетов свидетельствуют об отсутствии значимого годового тренда в направлении дальнего переноса за 1980-2050 гг. по обоим сценариям – преимущественный перенос веществ в регион КМВ – З-ЮЗ. В то же время сезонные вариации направлений, откуда идет загрязнение региона выражены достаточно ярко, кроме зимнего периода, для которого характерен устойчивый ЗЮЗ перенос. Весной по сценарию SSP2-4.5 основной поток примесей стабильно ожидается с запада-юго-запада, но при реализации сценария SSP5-8.5 перенос веществ поменяет направление с З-ЮЗ на Ю. По обоим сценариям летом также наблюдается усиление меридионального переноса примесей (с ЮЗ на Ю), осенью – напротив, ожидается выраженное усиление зонального переноса (с Ю-ЮВ на З). Таким образом, в разные сезоны опасность в плане дальнего загрязнения атмосферы в ближайшие десятилетия могут представлять источники, расположенные как западнее, так и южнее региона КМВ.

Практическое применение полученных результатов важно для определения будущего оздоровительного потенциала курортов КМВ и планирования развития территорий, которые могут оказать влияние на дальнейшее загрязнение уникального с природно-климатической точки зрения курортного региона.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием ИФА РАН при частичной поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (стратегический проект № 5 РУТ (МИИТ).

Сравнительный анализ данных измерений концентрации CO₂ в атмосфере, выполненных МГИ и ГГО в пгт. Кацивели за период с 2020 по 2024 гг.

Медведев Е.В.¹, Парамонова Н.Н.², Ивахов В.М.²

¹*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

²*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия*

eugene.medvedev1984@gmail.com

Ключевые слова: CO₂

МГИ проводит регулярные наблюдения за атмосферной концентрацией CO₂ на ЧГПП МГИ в районе Голубого залива южного берега Крыма с 2009 г. ГГО выполняет регулярный мониторинг концентрации CO₂атм. с середины 1980-х годов в соответствии с требованиями программы ВМО «Глобальная служба атмосферы» на государственной наблюдательной сети.

В 2020 г. МГИ и ГГО начали проводить совместные работы по мониторингу атмосферной концентрации CO₂ на ЧГПП МГИ, производя еженедельный отбор проб воздуха в металлические фляги с внутренним электрополированным покрытием.

С 2020 по 2024 ОБМ и лабораторией мониторинга и исследования потоков парниковых газов МГИ было произведено 54 измерения CO₂, а также отобрано около 150 проб для дальнейших измерений в ГГО. Измерения МГИ выполнялись in-situ с помощью газоанализатора LI-7000. Анализ проб воздуха выполнялся в лаборатории мониторинга малых газовых компонент атмосферы ГГО согласно РД 52.04.875-2019 на газовом хроматографе Кристалл 5000.2 (ЗАО СКБ Хроматек) с привязкой к шкале ВМО (погрешность измерений 0,2%).

В целях оценки сопоставимости данных измерений МГИ и ГГО в июне 2021 г. и сентябре 2024 г. параллельно с измерениями LI-7000 осуществлялся отбор проб воздуха рядом с пробозаборником. Результаты измерений за 2021 г. показали, что расхождения находятся в диапазоне от 0,02 до 0,73% (от 0,09 до 3,00 млн⁻¹), что не превышает погрешности метода измерения, используемого в МГИ (1%). Результаты параллельных измерений позволяют сделать предварительный вывод, что уровень сопоставимости данных наблюдений МГИ и ГГО находится в пределах 1%. Это удовлетворяет условиям точности фундаментальных исследований, проводимых в МГИ. Для того чтобы получить более надежную оценку сопоставимости результатов измерений МГИ и ГГО необходимо провести дополнительные эксперименты.

МГИ проводил данные измерения в рамках проекта FNNN-2022-0002 «Карбоновый полигон».

Работы ГГО частично поддерживаны ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Усовершенствованная версия модели серного цикла атмосферы для моделей Земной системы промежуточной сложности

Ныров А.О.^{1,2}, Елисеев А.В.^{1,2}, Мохов И.И.^{1,2}

¹Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
andrey.nyro@gmail.com

Ключевые слова: тропосферный цикл серы, сульфатный аэрозоль, сернистый газ, модель Земной системы промежуточной сложности, диметилсульфид

Модель серного цикла атмосферы ChAP для моделей Земной климатической системы промежуточной сложности расширена учётом диметилсульфида (ДМС) и влияния типа осадков на интенсивность выведения сульфатов из атмосферы. Наряду с этим изменена численная схема переноса примесей. Для сохранения вычислительной эффективности предлагаемой модельной версии остальные приближения (стационарность, предписанные вертикальные профили для концентраций соединений серы в атмосфере) остались без изменений. Изменения привели к улучшению согласия пространственного распределения сернистого газа и сульфатов с данными реанализа CAMS (Copernicus Atmospheric Monitoring System) для 2003-2019 гг. По расчётам с новой схемой глобальное содержание сернистого газа в атмосфере в 1990-2000 гг. составляет 0.2 TrS, сульфатов - 0.6-0.7 TrS при их характерном времени жизни 1 сут. и 6 сут. соответственно.

Концентрации метана и диоксида углерода в атмосфере Арктики по данным судовых и самолетных измерений

Панкратова Н.В.¹, Скороход А.И.^{1,2}, Беликов И.Б.¹, Белоусов В.А.¹, Кравчишина М.Д.³,
Новигатский А.Н.³, Белан Б.Д.⁴, Аршинов М.Ю.⁴, Баранов Б.В.³, Васильева А.В.¹, Давыдов Д.К.⁴,
Пестунов Д.А.⁴, Моисеенко К.Б.¹

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

²Университет Вены, Вена, Австрия

³Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия

⁴Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

n_pankratova@list.ru

Ключевые слова: Арктика, метан, углекислый газ, судовые измерения, самолетные измерения, воздушные массы, траекторный анализ

Представлены результаты прямых измерений концентрации метана CH_4 , $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ и углекислого газа (CO_2) в атмосферном воздухе с 5 по 18 сентября 2022 г. с борта научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» (рейс 89(1)) в южной части Карского и Баренцева морей. Данные судовых измерений впервые для российской части Арктики сопоставлены с профилями CH_4 и CO_2 в слое от 200 до 9000 метров, полученными с 9 по 10 сентября 2022 г. в ходе синхронных судовых и самолетных измерений с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»» в Карском море. В южной части Карского моря наблюдается увеличение концентрации метана в нижнем приводном слое (на ~ 10 ppb), что, по всей вероятности, можно связать с наличием местных источников его поступления в районе исследования. По результатам анализа обратных траекторий выявлена зависимость концентрации метана от направления адвекции воздушных масс. При адвекции с севера концентрация метана стремится к фоновому значению, характерному для этого региона (~ 1.990 ppb). При поступлении воздуха с юга из континентальных районов Европейской территории России и Казахстана, наоборот, происходит значительное повышение концентрации метана в атмосферном воздухе до 2.060–2.070 ppb. Выявлены локальные случаи повышения концентрации метана в районе струйно-пузырьковой разгрузки метан-содержащих флюидов на дне Байдаракской губы, очевидно, связанных с холодными метановыми сипами.

Химико-транспортная модель переноса NO_x в атмосферном пограничном слое: сравнение RANS и LES моделирования, использование для обработки спутниковой съемки шлейфов NO_2

Пашенцева Е.В.¹, Мухартова Ю.В.², Мортиков Е.В.³, Постыляков О.В.¹

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

²Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
pashenceva002@gmail.com

Ключевые слова: химико-транспортная модель, окислы азота, спутниковый шлейф

В работе рассматриваются и сравниваются два подхода к моделированию процесса переноса NO_x в атмосфере (RANS и LES моделирование), а также с их помощью анализируются спутниковые снимки шлейфов NO_2 . Одной из целей работы был выбор ключевых реакций для NO_x путем решения задачи Коши для системы кинетических уравнений и сравнения результатов с моделью атмосферной химии RACM [1]. Соответствующие кинетические уравнения были включены в систему уравнений диффузии-реакции-адвекции:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) C_i = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \text{div}_{\perp} (K_{\perp} \nabla_{\perp} C_i) + \Psi_i (C_1, \dots, C_I) - C_i \Phi_i (C_1, \dots, C_I) + f_i, \quad i = 1, \dots, I$$

в которой компоненты скорости ветра либо были получены путем интерполяции данных реанализа ERA5 на расчетную сетку для рассматриваемого промежутка времени, а коэффициент K рассчитан в узлах сетки с помощью RANS-модели, реализованной НИВЦ МГУ, либо для компонент скорости и K использовалась LES-модель НИВЦ МГУ [2,3]. Необходимые в качестве форсинга данные, такие как температура, давление, влажность воздуха и тенденции, также получены на основе интерполированных данных ERA5. С помощью разработанной химико-транспортной модели была проведена обработка шлейфов NO_2 в провинции Хэбэй (Китай) на снимке, полученном с помощью аппаратуры ГСА на спутнике Ресурс-П с горизонтальным разрешением 2.4 км [4], продемонстрировавшая качественное и количественное согласование результатов моделирования с измерениями.

Литература:

1. Stockwell W.R. et al., Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1997. 102(D22), 25847-25879
2. Tkachenko E.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V., Glazunov A.V. 2022. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 58(3), 219-236
3. Debolskiy A.V., Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lupkes C. 2023. Boundary-Layer Meteorol., 1-21
4. Postylyakov O.V., Borovski A.N., Makarenkov A.A. Proc. SPIE, 10466, 104662Y-8(2017). Doi: 10.1117/12.2285794

Оценка влияния парниковых газов и атмосферного аэрозоля на коротковолновую и длинноволновую радиацию

для условий безоблачного неба

Петров Н.А.^{1,2}, Чубарова Н.Е.^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

nial.03@mail.ru

Ключевые слова: радиационное воздействие, климатические изменения, радиационный форсинг, модель ECRAD, радиационный баланс, скорость радиационного нагрева, аэрозоль, углекислый газ, озон

Газово-аэрозольный состав определяет особенности радиационного баланса в атмосфере и связанные с ним климатические изменения. В исследовании приводятся оценки антропогенного воздействия важнейших парниковых газов (углекислого газа CO₂, озона O₃), а также атмосферного аэрозоля на атмосферную радиацию (RF) в коротковолновом и длинноволновом спектре. Радиационное воздействие представлено для Московского региона (55,71° с.ш., 37,52° в.д.) в тёплый и холодный сезоны при различных геофизических условиях. Для расчётов RF была использована современная радиационная модель ECRAD [1] в автономном режиме. Настраиваемая структура модели позволяет использовать её для независимой оценки влияния отдельных геофизических параметров на атмосферную радиацию.

В качестве входных данных использовались осреднённые за период 2003-2023 гг. среднемесячные данные реанализов ERA5 [2], CAMS [3] и IFS Cycle 47R1. Все данные были линейно интерполированы в единую сетку (0.25°x0.25°, 37 вертикальных уровней). Расчёты RF проведены для реальных диапазонов изменений содержания CO₂, O₃ и аэрозоля с сохранением формы вертикального профиля при различных высотах Солнца и альбедо поверхности. Определены особенности вертикальных профилей RF в солнечном и тепловом спектре относительно доиндустриального уровня, а также их величины на ВГА и НГА. В тёплый период года общее антропогенное радиационное воздействие RF^{total} с учётом сезонности изменения примесей составило -8,33 Вт/м² на НГА и -1,35 Вт/м² на ВГА. В холодный период RF^{total} оценено в -0,08 Вт/м² на НГА и +0,38 Вт/м² - на ВГА. Также обнаружена нелинейная зависимость RF примесей от высоты Солнца и альбедо поверхности. Антропогенное изменение радиационного баланса способствует радиационному выхолаживанию стратосферы до -2.76 К/сут и нагреву приземной тропосферы до 0.45 К/сут в тёплый период. Проведённые исследования могут служить для тестирования качества воспроизведения радиации в глобальных климатических моделях.

Литература:

1. Hogan, R. J., Bozzo, A. A flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model // Journal of Advances in Modeling Earth Systems – 2018 – 10.
2. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Meteorological Society – 2020 – 146.
3. Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A. et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // Atmospheric Chemistry and Physics - 2019 - 19(6).

Оценка облачно-радиационных эффектов с использованием модели ECRAD для Московского региона

Петров Н.А.^{1,2}, Чубарова Н.Е.^{1,2}, Шатунова М.В.², Шувалова Ю.О.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

nial.03@mail.ru

Ключевые слова: модель ECRAD, ICON-LAM, облачно-радиационный эффект (CRE), скорость радиационного нагрева, облачные алгоритмы, «McICA», «Tripleclouds», «SPARTACUS»

Правильное описание макрофизической структуры облачности является актуальной задачей прогностических моделей ввиду неопределённости вычислительно эффективного расчёта их радиационных свойств. Целью работы является анализ облачных вычислительных алгоритмов, которые доступны в автономной версии радиационной модели ECRAD [1], используемой в модели ICON [2], на примере Московского региона (55,71° с.ш., 37,52° в.д.).

Входные данные для ECRAD были получены по результатам детальных численных расчётов негидростатической модели ICON-LAM [2] для ограниченной территории на 15.08.2021 г. на сетке с шагом 4.4 км и с использованием 90 вертикальных уровней. Радиационные расчёты в ECRAD были проведены с использованием различных алгоритмов: «McICA», «Tripleclouds» и «SPARTACUS». Облачно-радиационный эффект (CRE) был вычислен как разность в величинах коротковолнового и длинноволнового балансов между облачными и безоблачными условиями. Представлены эксперименты, направленные на анализ пространственных и вертикальных распределений различий в CRE и скоростях радиационного нагрева. В частности, исследуется важность представления облака в виде двух областей с разной оптической толщиной, реализованной в «Tripleclouds». Также приведена оценка явного представления упрощённых трёхмерных радиационных эффектов облачности, доступных в «SPARTACUS».

По данным расчётов получены стохастические несмещённые шумы при расчётах с использованием алгоритма «McICA». Учёт в алгоритме «Tripleclouds» дополнительной структуры облака уменьшает CRE в солнечном (около 30 Вт/м²) и увеличивает CRE в тепловом диапазоне (около 3 Вт/м²) для балла облачности 9-10 у земной поверхности и на ВГА. 3D модельные эффекты облачности с использованием «SPARTACUS» положительны и оценены в медианных значениях от 5 до 10 Вт/м² у поверхности и от 12 до 18 Вт/м² на ВГА для коротковолнового диапазона при значении водосодержания облаков от 170 до 1700 г/м³. В длинноволновом спектре 3D-эффекты составили до 2 Вт/м².

Литература:

1. Hogan, R. J., Bozzo, A. A. flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model // Journal of Advances in Modeling Earth Systems – 2018 – 10.
2. Prill F., Reinert D., Rieger D., Zängl G., ICON Tutorial. Working with the ICON Model. // Deutscher Wetterdienst Business Area “Research and Development” – 2024.

Исследования трендов состава атмосферы и их отклика на климатические изменения на основе орбитальной информации и модельных расчетов

Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Кириллова Н.С., Федорова Е.И.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
vadim@ifaran.ru

Ключевые слова: состав атмосферы, тренды, дистанционное зондирование, орбитальные и наземные наблюдения, модельные расчеты

С использованием орбитальных (AIRS) и наземных (NDACC и ИФА РАН) долговременных спектроскопических рядов измерений общего содержания (ОС) оксида углерода CO и метана CH₄, а также модельных расчетов GEOS-Chem с различными сценариями задания эмиссий, были исследованы тренды состава атмосферы в разные периоды и сезоны, начиная с 2003 года. Получены оценки отклика трендов CO на изменения климата. Выполнена валидация глобальной транспортно-химической модели GEOS-Chem, исследована ее способность воспроизводить поля общего содержания и трендов ОС CO, CH₄ и NO₂.

Согласно как орбитальным, так и наземным данным и модельным расчетам после ≈2007 - 2008 гг. тренды CO и CH₄ в незагрязненных районах Евразии одновременно изменились. В летние и осенние месяцы тренды ОС CO в большинстве средне- и высокоширотных регионов Европы и Азии, включая Арктику, изменили свой знак с отрицательного на положительный (возрастание со скоростью до 1%/год). Темпы роста ОС CH₄ увеличились в Северной Европе, а также в тропических и субтропических регионах Евразии (до 0,6%/год). Модельные расчеты GEOS-Chem с использованием фиксированных антропогенных эмиссий CO и CH₄ и эмиссий этих газов от природных пожаров позволили установить отклик трендов CO на климатические изменения и связанный с ними рост концентраций CH₄, начавшийся примерно в 2007 году. Одной из возможных причин положительной динамики трендов ОС CO могут быть изменения в глобальной фотохимической системе, вызванные глобальными климатическими процессами, а также нарушением соотношения «источники/стоки» малых газовых составляющих атмосферы и образованием дополнительного оксида углерода из метана и неметановых углеводородов (НМУВ).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №20-17-00200.

Суточные вариации $PM_{2.5}$ и температуры воздуха в летний период 2023 года и их связь, по данным ЦГМ ИДГ РАН

Рябова С.А.^{1,2}

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

riabovasa@mail.ru

Ключевые слова: суточный ход, массовая концентрация аэрозольных частиц, $PM_{2.5}$, температура воздуха, условия «хорошей погоды», корреляционный анализ

На основе данных инструментальных наблюдений, выполненных в Центре геофизического мониторинга г. Москвы Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, проанализированы: суточный ход массовой концентрации аэрозольных частиц размером меньше 2.5 мкм ($PM_{2.5}$) и суточный ход температуры воздуха в приземном слое атмосферы. При определении суточной вариации концентрации частиц $PM_{2.5}$ отобраны дни с погодными условиями, близкими к условиям «хорошей погоды». Отбраковывались дни с осадками в виде дождя, с сильной облачностью, с максимальной среднесуточной горизонтальной скоростью ветра больше 3.5 м/с и с максимальной мгновенной горизонтальной скоростью ветра больше 7.5 м/с. Проведен анализ корреляционных зависимостей между вариациями температуры и массовой концентрацией частиц $PM_{2.5}$ на основе вычисления коэффициента линейной корреляции Пирсона и на основе вычисления кросс-коррелограммы.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИДГ РАН № 122032900185-5 "Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях" и в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Временные вариации радона и метеопараметров по данным обсерватории Карымшина на Камчатке за 2014–2023 гг.

Рябова С.А.^{1,2}, Копылова Г.Н.³

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

³Камчатский филиал Единой Геофизической Службы РФ, Паратунка, Россия

riabovasa@mail.ru

Ключевые слова: радон, суточные вариации, сезонные вариации, температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление

Влияние радона и его дочерних продуктов на ионизационный баланс приземного слоя атмосферы определяется интенсивностью экскаляции подпочвенного радона и метеорологическими условиями (конвекция, турбулентность и стратификация приземного слоя атмосферы). В настоящей работе исследованы суточные и сезонные вариации радона по данным обсерватории Карымшина на Камчатке за период с января 2014 года по декабрь 2023 года. Проведен анализ корреляционных связей между вариациями радона и метеорологическими параметрами (температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление).

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ 22-17-00125.

Численное моделирование изменения химического состава нижней и средней атмосферы в конце XX - начале XXI веков

Смышляев С.П.¹, Яковлев А.Р.¹, Ромашенко Д.Д.¹, Усачева М.А.^{1,2}, Иманова А.С.^{1,2}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

smvshl@rshu.ru

Ключевые слова: газовый состав, тропосфера, стратосфера, химические реакции, численное моделирование

Новая версия химико-климатической модели ИВМ РАН - РГГМУ на базе климатической модели INMCM60 используется для оценки изменчивости содержания озона и температуры тропосферы и стратосферы в течение периода с 1980 до 2020 годы. Результаты численного моделирования сравниваются с данными ре-анализа, спутниковыми и наземными измерениями. Помимо базового численного эксперимента анализируются также результаты дополнительных расчетов, в которых влияющие на изменчивость озона и температуру факторы учитываются по отдельности. Результаты дополнительных экспериментов позволили оценить относительный вклад таких факторов как выбросы парниковых и озоноразрушающих газов, солнечная активность, изменение температуры поверхности океана, содержание сульфатного аэрозоля и выбросы окислов азота с поверхности. Особенности изменчивости озона и температуры в тропических, умеренных и полярных широтах анализируются и сравниваются с другими химико-климатическими моделями, данными реанализа и измерениями.

Измерение высоты, размеров частиц и волновых свойств полярных мезосферных облаков на основе сетевых фотометрических и триангуляционных измерений

Угольников О.С.

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

ougolnikov@gmail.com

Ключевые слова: мезосфера, лед, частицы, рассеяние, фотометрия, триангуляция

Полярные мезосферные облака – самые высокие в земной атмосфере – располагаются в области температурного минимума в верхней летней мезосфере. Их появление, а также микрофизические свойства, определяются переносом воздушных масс и волновыми процессами в мезосфере. Изменение высоты и характеристик облаков могут проявлять связь с климатическими трендами, в частности, с ростом содержания парниковых газов. Это определяет актуальность систематических измерений, в частности наземных, полей мезосферных облаков при их появлении.

Высота поля облаков может быть измерена посредством триангуляции с использованием сети наземных фотографических и фотометрических камер. При наличии многоцветной (RGB) фотометрии высота может быть измерена на основе измерений спектральных характеристик облаков при погружении в тень Земли. Сопоставление двух методов позволяет также уточнить модель переноса излучения в атмосфере. Сравнение спектральных характеристик одного элемента облаков при наблюдении из разных пунктов позволяет также определить эффективный размер частиц. В дальнейшем предполагается создание методики исследования трехмерной структуры облаков и ее эволюции.

Об определении высоты нижней границы облачности с использованием нейросетей по стереосъемке с Земли

Устимов И.А.^{1,2}, Чуличков А.И.^{1,2}, Постыляков О.В.¹

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

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ustimovi@bk.ru

Ключевые слова: нижняя граница облачности, нейронные сети, стереокалибровка, компьютерное зрение

Погрешности измерения состава атмосферы оптическими методами (DOAS и др.) существенно зависят от рассеяния в атмосфере, наибольший вклад в которое дает облачность. При наличии информации об облаках оптическая модель атмосферы, используемая для интерпретации измерений, может быть скорректирована, и погрешности восстановления уменьшаются. Для оценивания такой важной для оптических измерений характеристики как нижняя граница облачности разрабатывается метод, основанный на съемке неба парой камер. Камеры предварительно калибруются по снимкам звёзд с целью поиска аффинного преобразования, связывающего системы координат двух камер. Откалиброванные камеры производят снимок нижней границы облаков, после чего по паре изображений решается задача соотнесения общих точек на изображении с помощью нейросети. Затем, полученные пары соответствий обрабатываются с помощью алгоритма кластеризации с целью оценки истинного смещения. Полученное смещение, при известных физических параметрах камеры, позволяет определить расстояние до объекта на изображении, то есть, высоту нижней границы облачности.

Литература:

1. Математическое моделирование системы анализа изображений облаков для оценки их высоты и скорости движения. Никитин Станислав Викторович, Чуличков Алексей Иванович. (2018)
2. Компьютерные методы оценивания высоты и скорости движения облаков по их изображениям, Андреев Максим Сергеевич, Чуличков Алексей Иванович. (2014)

Оценка дрейфа качества орбитальных наблюдений и применение методов коррекции к долговременным рядам измерений общего содержания CH_4 и CO спектрометра AIRS

Федорова Е.И., Ракитин В.С., Кириллова Н.С., Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф.

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

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

fedorova@ifaran.ru

Ключевые слова: состав атмосферы, дистанционное зондирование атмосферы, валидация, общее содержание, метан, монооксид углерода, наземные измерения, дрейф

Работа посвящена валидации спутниковых данных AIRS v6 об общем содержании (ОС) CH_4 и CO по 18-ти наземным станциям мониторинговой сети NDACC за период 2003-2022 гг. Разработана методика коррекции орбитальных данных, улучшающая характеристики соответствия наземным измерениям и увеличивающая точность оценок трендов состава атмосферы.

Для всех исследованных станций линейный тренд разности спутниковых и наземных измерений (AIRS-GR) ОС CH_4 (дрейф невязки) имеет отрицательное значение. Установленный эффект свидетельствует о наличии дрейфа параметров спутникового спектрометра.

Средняя величина дрейфа невязки ОС CH_4 для всех 18-ти пунктов измерений NDACC составила $1,69\text{E}+14$ молек/ cm^2 в день. Данный коэффициент использовался для динамической коррекции орбитальных рядов измерений.

После введения динамической поправки на всех станциях наблюдается увеличение коэффициента корреляции R , в т. ч. и в тех пунктах, где корреляция была исходно высока. По исходным оценкам AIRS средний тренд ОС CH_4 за исследуемый период составлял $0,26 \pm 0,03$ %/год (тренд $\pm 95\%$ доверительный интервал). После применения динамической коррекции, «постанционные» значения «спутниковых» и «наземных» трендов значительно сблизились. Средний тренд ОС CH_4 AIRS составил $0,43 \pm 0,03$ %/год, что хорошо соотносится с наземными оценками ($0,40 \pm 0,02$ %/год).

Для данных ОС CO установлено отсутствие дрейфа параметров спутникового прибора. Линейный тренд разности AIRS-GR имеет различную направленность и на большинстве станций статистически не значим. Данные не требуют коррекции в рамках разработанной методики, т.к. исходные ряды ОС CO без применения фильтрации имеют хорошую корреляцию в общем массиве ($R = 0,94$), а средний тренд ОС CO совпадает по оценкам спутниковых и наземных измерений и равен, соответственно, $-0,62 \pm 0,22$ и $-0,62 \pm 0,24$ (%/год).

Разработанная методика универсальна и применима к любым спутниковым долговременным наблюдениям.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-17-00200.

Черты геохимии олово́й пыли в приводном слое атмосферы над морями Евразийской Арктики

Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Новигатский А.Н.
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
vshevch@ocean.ru

Ключевые слова: олово́вая пыль, рассеянное осадочное вещество, приводный слой атмосферы, Евразийская Арктика, многоэлементный состав, обогащение химическими элементами, загрязнения

В докладе обобщены результаты исследований черт геохимии олово́й пыли (рассеянного осадочного вещества атмосферы) в приводном слое атмосфере над морями Евразийской Арктики, выполненных сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН совместно с коллегами из ряда российских и зарубежных институтов, а также литературные данные [1, 2].

В 1991–2015 гг. сетевым методом собрали 81 пробу олово́й пыли над морями Евразийской Арктики; многоэлементный состав в 53 пробах был изучен методом инструментального нейтронно-активационного анализа, в ряде проб он был определен методами атомно-абсорбционного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [2].

На основании геохимических исследований и изучения загрязнений арктической атмосферы удалось выявить главные точечные и локальные источники загрязнений. Удалось по соотношениям элементов установить "лицо" загрязнений (включая черный углерод) из каждого источника (из крупнейших индустриальных областей), проследить конкретные траектории прохождения воздушных масс в Арктику и связанных с ними загрязнений.

Учитывая значительное обогащение олово́го осадочного вещества Pb, Sb, Cd, V относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры [3], можно предположить, что для этих элементов олово́ый путь является основным путём их поступления в донные осадки арктических морей [2].

Таким образом, показано, что знание черт геохимии олово́й пыли в приводном слое атмосферы над морями Евразийской Арктики важны для оценки влияния на окружающую среду, осадконакопление и климатические изменения атмосферного переноса рассеянного осадочного вещества.

Обобщение полученных данных выполнено в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема FMWE-2024-0020).

Литература:

1. Лисицын А.П. Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. С. 1398–1439.
2. Шевченко В.П., Голобокова Л.П., Сакерин С.М. и др. Рассеянное осадочное вещество атмосферы над Баренцевым морем // Система Баренцева моря. М.: ГЕОС, 2021. С. 127–142.
3. Rudnick R.L., Gao S. Composition of continental crust // Treatise on Geochemistry. V. 3. The Crust. Amsterdam, N.Y.: Elsevier, 2003. P. 1–64.

**Метан в Арктике поздней осенью 2023 года:
наблюдения АМК-93 и численное моделирование**

Штабкин Ю.А.¹, Моисеенко К.Б.¹, Беликов И.Б.¹, Белоусов В.А.¹, Васильева А.В.¹, Кравчишина М.Д.²

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

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

yuryshtabkin@gmail.com

Ключевые слова: метан, арктика, наблюдения, численное моделирование, загрязнение воздуха, дальний перенос

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 метана $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ 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-климатической модели WRF-Chem и показаны первые модельные оценки полей приземного содержания метана для отдельных районов российской Арктики.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект №20-17-00200.

Об электрических и электромагнитных свойствах ветропесчаного потока в условиях умеренных ветров

Абделаал М.Э.^{1,2}, Малиновская Е.А.³, Чхетиани О.Г.³, Максименков Л.О.³, Кузнецов И.А.²,
Дольников Г.Г.², Захаров А.В.²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
mohamad.essam@phystech.edu

Ключевые слова: электромагнитные сигналы, факторы окружающей среды, скорость ветра, интенсивность солнечного излучения, многомерный анализ, спектральный анализ, исследование планет

Пылевой вынос с поверхности аридных и субаридных территорий инициируется при движении сальтирующих частиц, накапливающих при этом электрический заряд. Перераспределение частиц разного размера и заряда влияет на форму пыльных вихрей (как на Земле, так и на Марсе) [1]. Исследование электрических и электромагнитных свойств ветропесчаного потока проводилось во время комплексных измерений ИФА им. А.М. Обухова РАН (Калмыкия, 2024 г.) в условиях, способствующих возникновению конвективных вихрей и электризации [2].

28 и 29 июля днем температура воздуха на высоте 2 м достигала 35°C, а скорость ветра 4 м/с (с 21:30 до 22:00 28.07: 5-6 м/с). Величина напряженности на верхнем уровне измерений 5 м в целом выше на 1000 В/м, чем на нижнем уровне 0.5 м, где за исключением отдельных всплесковых изменений её значения колебались ниже 600 В/м (преобладали положительные значения). Разность относительных значений напряженности электрического поля на двух уровнях отличалась не более, чем на 10%, в моменты ослабления ветра возникали всплески (до 80%).

С помощью электромагнитного анализатора из пылевого комплекса ИКИ РАН, разработанного к миссии ЭкзоМарс измерялись электромагнитные сигналы в диапазоне частот от 200 до 500 кГц. Для обработки данных применялись корреляционный спектральный анализ, регрессионное моделирование [3].

Фиксировались электромагнитные сигналы в частотном диапазоне 300-350 кГц. Например, наблюдался всплеск 3,27 мкс с амплитудой 293,4 мВ и средним квадратическим отклонением 221,14 мВ, что отражает умеренную изменчивость уровня сигнала.

Выявлены связи между интенсивностью солнечного излучения, скоростью ветра, амплитудой и частотой электромагнитного сигнала. Кросс-корреляционный анализ показывает возможность запаздывающего во времени влияния температурных изменений.

Абделаал М.Э. выражает благодарность сотрудникам ИФА им. А. М. Обухова РАН за полезные советы и возможность участия в измерительной кампании 2024 г.

Литература:

1. Kurgansky M.V. et al. A simple model of the magnetic emission from a dust devil //J. of Geophysical Research: Planets. 2007. T. 112. №. E11. 2. Малиновская Е. А. и др. О связи приземного электрического поля и аридного аэрозоля при различных ветровых условиях, Доклады РАН. Науки о земле, 2022, том 502, № 2, с. 69–78. 3. Abdelaal M. E. et al. Experimental modeling of atmospheric discharge phenomena and charged dust particle interactions, Frontiers in Astr. and Space Scs. 2024. T. 11. C. 1347048.

Оценка автокорреляционных функций вариаций атмосферного электрического поля

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А., Климанова Е.В., Козьмина А.С., Афиногенов К.В.
Геофизическая обсерватория "Борок" ИФЗ РАН, Борок, Россия
svga@borok.yar.ru

Ключевые слова: атмосферное электрическое поле, натурные наблюдения, линейка Голомба, автокорреляционная функция

Хаотический характер вариаций атмосферного электрического поля, наблюдаемого вблизи земной поверхности, отражает сложную динамику электрических зарядов в атмосфере с неоднородной электрической проводимостью и распределёнными генераторами, поддерживающими глобальную разность потенциалов между ионосферой и земной поверхностью. Одной из важных проблем геофизической электродинамики является декомпозиция вкладов от различных источников в наблюдаемые вариации электрического поля и плотности атмосферного электрического тока. Одновременные измерения несколькими датчиками, разнесёнными в пространстве специальным образом, предоставляют возможность выполнить оценку вклада источников различных масштабов для построения иерархического базиса, разложение по которому полученного сигнала позволяет получить решение указанной проблемы в статистическом смысле.

Для заданного количества датчиков оптимальное расположение вдоль прямой, обеспечивающее максимальное количество различных попарных расстояний между ними, реализуется при установке датчиков в соответствии с делениями шкалы линейки Голомба. Для оценки автокорреляционных функций вариаций атмосферного электрического поля в диапазоне масштабов 2.5 – 400 м использовался набор из 8 флюксометров, 7 из которых устанавливались в линейку Голомба, а оставшийся располагался отдельно на расстоянии, превышающем длину линейки, под углом ней. В рамках одномерной модели экспоненциально коррелированной последовательности точечных электрических зарядов, расположенных на прямой параллельно над проводящей плоскостью, выполнен анализ зависимости автокорреляционных функций электрического поля в зависимости от корреляционного радиуса в линии зарядов и высоты их расположения. Показано, что автокорреляционные функции пространственных и временных вариаций атмосферного электрического поля аппроксимируются с помощью линейной комбинации неполных гамма-функций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00053).

Численные оценки ЭДС конвективного генератора невозмущённой атмосферы над сушей средних широт

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А.

Геофизическая обсерватория "Борок" ИФЗ РАН, Борок, Россия

aleksandr.prokhorchuk@mail.ru

Ключевые слова: атмосферное электричество, турбулентный генератор, численное моделирование, вихререзающее моделирование, средние широты, ЭДС

Глобальная разность потенциалов между ионосферой и земной поверхностью поддерживается ЭДС атмосферных электрических генераторов, к которым относятся грозы, осадки, облака с развитой электрической структурой, а также невозмущённые области атмосферы, в которых конвекция и турбулентное перемешивание воздушных масс осуществляют перенос объёмных зарядов [1]. Электродинамика атмосферного пограничного слоя (АПС) определяется совместным действием глобальных генераторов, переносом излучения, метеорологическими процессами и турбулентностью, динамикой аэрозольных частиц и радиоактивных газов, выделяющихся из грунтовых пород и ионизирующих атмосферу вместе с космическими лучами, распределением объёмного заряда и электрической проводимости, а также типом и рельефом земной поверхности [2]. На основе численного моделирования электродинамики АПС выполнены оценки величины ЭДС конвективного генератора невозмущённой атмосферы над сушей средних широт и исследована зависимость ЭДС от определяющих переменных. Величина глобальной разности потенциалов оценивается в модели с использованием данных, полученных в результате серии высотных электрических наблюдений, проведённых с помощью привязного аэростата и специальной инструментальной платформы [3]. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2022-0025.

Литература:

1. Anisimov, S.V. et. al. Turbulent electric current in the marine convective atmospheric boundary layer // Atmos. Res. 2019. 228, С. 86–94.
2. Anisimov, S.V. et. al. Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // Atmos. Res. 2020. 244, 105035.
3. Anisimov, S.V. et. al. Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // Atmos. Res. 2020. 250, 105355.

Сравнение результатов мезомасштабного и вихреразрешающего моделирования с данными наблюдений в пограничном слое атмосферы

Анисимов С.В.¹, Мареев Е.А.², Галиченко С.В.¹, Прохорчук А.А.¹, Климанова Е.В.¹, Козьмина А.С.¹,
Афиногенов К.В.¹, Гурьев А.В.¹

¹Геофизическая обсерватория "Борок" ИФЗ РАН, Борок, Россия

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
svga@borok.yar.ru

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, мезомасштабное моделирование атмосферы, вихреразрешающее моделирование, турбулентность, натурные наблюдения

Интенсивное развитие численных моделей прогноза погоды и климата, обусловленное экспоненциальным ростом производительности суперкомпьютеров и расширением сети наблюдений, происходит в двух направлениях. В одном из подходов основные усилия сосредоточены на развитии моделей глобальной циркуляции, решающих упрощённые уравнения геофизической гидродинамики, и направлены на более детальное описание ключевых физических процессов, измельчение расчётных сеток до субкилометрового масштаба и развитие методов усвоения данных. Альтернативный подход сосредоточен на развитии микрометеорологических моделей, явно разрешающих длинноволновую часть и часть инерционного интервала спектра турбулентных вихрей в атмосферном пограничном слое (АПС), направлен на увеличение расчётной области и подключение дополнительных модулей, описывающих физические процессы, при практически постоянном пространственном разрешении.

В работе развита численная модель микрометеорологии и турбулентной динамики дневного атмосферного пограничного слоя над сложной поверхностью на основе вложения вихреразрешающей модели PALM в мезомасштабную модель прогноза погоды WRF. Численное моделирование метеорологических полей и турбулентной динамики АПС выполнено с помощью последовательного вложения двух областей вихреразрешающей модели в три области расчета мезомасштабной модели с использованием нисходящего масштабирования сеток с увеличением горизонтального разрешения от $9 \times 9 \text{ км}^2$ до $30 \times 30 \text{ м}^2$. Результаты моделирования сравниваются с данными акустического и микроволнового зондирования атмосферы, а также наземных и высотных наблюдений с использованием привязного аэростата с платформой, оснащённой датчиками температуры и влажности. Получены оценки отклонений основных метеорологических и турбулентных параметров, прогнозируемых моделью, от измеренных значений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00053).

Моделирование переноса аэрозолей в пограничном слое при типичных конфигурациях городской застройки

Варенцов А.И.^{1,2}, Мортиков Е.В.^{1,2,3}, Степаненко В.М.^{1,2}, Глазунов А.В.^{3,1}

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
aivarentsov98@gmail.com

Ключевые слова: вихреразрешающее моделирование, перенос аэрозолей, лагранжьев подход, локальные климатические зоны

На основе вихреразрешающей гидродинамической модели (LES, Large Eddy Simulation) атмосферных течений НИВЦ МГУ и ИВМ РАН разработан модуль лагранжева переноса твёрдых частиц в городской среде. В разработанном модуле учитывается взаимодействие частиц с поверхностями земли и зданий, а также влияние турбулентности подсеточного масштаба на перенос частиц. Последнее реализовано с помощью набора лагранжевых стохастических моделей (ЛСМ), включающего ЛСМ 0-го порядка (модель случайных смещений) и ЛСМ 1-го порядка (модель Ланжевена).

При помощи LES-модели с разработанным модулем производились расчёты динамики воздушных течений и переноса частиц при нейтральной стратификации для набора различных конфигураций городской застройки, отличающихся плотностью, высотой, ориентацией и расположением зданий. Также данные конфигурации соответствовали нескольким определённым локальным климатическим зонам (LCZ, local climate zones), что позволяет анализировать результаты экспериментов с точки зрения влияния не только отдельных характеристик застройки, но и полноценных её типов, соответствующих распространённой классификации LCZ.

Рассматривается влияние типов и характеристик застройки и свойств самих частиц на перенос аэрозолей от источника, имитирующего выбросы загрязняющих веществ на городской улице вблизи поверхности земли. Оценивается применимость разработанной технологии для данной задачи, а также анализируются особенности распространения и накопления частиц в городском пограничном слое атмосферы на масштабе отдельных улиц и зданий. Предполагается, что полученные результаты и проделанная работа являются первым шагом к уточнению описаний процессов переноса частиц в городах в глобальных и региональных моделях и созданию градостроительных рекомендаций, направленных на улучшение качества воздуха.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 24-17-00155 и 21-71-30023.

Мониторинг турбулентного энергообмена городских ландшафтов с атмосферой в Северной Евразии: первые результаты

Варенцов М.И.^{1,2,3}, Тельминов А.Е.⁴, Кобзев А.А.⁴, Дрозд И.Д.², Пашкин А.Д.², Гавриков А.В.⁵,

Артамонов А.Ю.², Репина И.А.^{2,1}, Степаненко В.М.^{1,2}, Джоу Л.⁶

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИИЦ, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

⁴Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

⁵Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁶Институт физики атмосферы Китайской академии наук, Пекин, КНР

mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

Ключевые слова: климат города, потоки тепла, потоки импульса, пульсационные измерения, мониторинг, Северная Евразия, Москва, Томск, Пекин

Для учета влияния городов на атмосферные процессы в моделях прогноза погоды и климата используются так называемые городские параметризации. К настоящему времени разработано большое количество таких параметризаций разного уровня сложности, многие из которых имплементированы в модели атмосферы [1]. Проводятся крупные международные проекты по взаимному сравнению и верификации городских параметризаций [2].

Для верификации и калибровки городских параметризаций наиболее ценными являются наблюдения за характеристиками энергообмена атмосферы с поверхностью - потоками тепла, влаги и импульса - величинами, которые параметризации должны рассчитывать и передавать в модель атмосферы. Такие наблюдения выполняются на мачтах выше уровня крыш, и являются крайне редкими. Так, в последнем международном проекте по сравнению городских параметризаций Urban Plumber [2] удалось собрать набор данных только для 20 городских мачт [3], в котором никак не представлена континентальная часть Северной Евразии, в т.ч. территории России и Китая.

В докладе представлены первые результаты работы по сбору, систематизации и анализу немногочисленных наблюдений за турбулентным энергообменом городских ландшафтов с атмосферой в Северной Евразии. Использованы данные микрометеорологической мачты в метеообсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова в Москве [4], сети пульсационных измерений Tomskfluxnet в городе Томск и его окрестностях, а также метеорологических мачт ИФА КНР в городе Пекин и его пригороде Сянхе [5]. Уникальность данных для Томска и Пекина заключается в возможности сравнения характеристик взаимодействия атмосферы с поверхностью для городских и фоновых условий. Показано, что потоки явного тепла и импульса в городе в среднем существенно, (на десятки процентов, а в отдельных случаях в разы) превышают фоновые значения. В дальнейшем планируется использовать подготовленные данные для тестирования и верификации городских параметризаций.

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 24-1700-155.

Литература:

1. Тарасова М.А. и др. Параметризации... // Изв. РАН. ФАО. 2023. Т. 59, № 2. С. 127–148.
2. Drozd I. et al. Atmospheric turbulence... // Russ. J. of Earth Sci. 2022. V. 22, № 5. P. ES01S11.
3. Lipson M. et al. Harmonized gap-filled datasets... // Earth Syst. Sci. Data. 2022. V. 14. № 11. P. 5157–5178.
4. Lipson M. et al. Evaluation of 30 urban... // J. Roy. Meteorol. Soc. 2024. V. 150. № 758. P. 126–169.
5. Wang L. et al. Contrasting characteristics... // Adv. Atmos. Sci. 2015. V. 32. № 4. P. 505–514.

Исследование взаимодействия параметризаций вертикального турбулентного перемешивания и конвекции в модели INMCM

Дебольский А.В.^{1,2}, Мортиков, Е.В.^{1,3}

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
and.debol@srcc.msu.ru

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, конвекция, параметризации турбулентного перемешивания

В работе рассматриваются локально-одномерная версия модели атмосферного пограничного слоя (АПС), используемая в климатической модели INMCM [1], совмещенная с новой версией блока приземного слоя. Существующая схема конвекции на основе параметризации потока массы (“mass-flux”) в INMCM не согласована со схемой перемешивания пограничного слоя. Подход EDMF (Eddy-Diffusivity Mass-Flux) предназначен для решения данной проблемы и демонстрирует значительные преимущества в представлении слоя вовлечения в верхней части АПС, улучшая воспроизведение кучевой и слоисто-кучевой облачности в моделях климата [2]. Реализация EDMF подхода рассматривается как один из следующих этапов в развитии блока параметризаций АПС в модели INMCM. Также рассматриваются согласование с внедряемыми параметризациями противогradientного переноса. Анализ и тестирование параметризаций мелкой и глубокой конвекции и воспроизведение облачности производилось в наборе тестовых численных экспериментов (BOMEX, DYCOMS I-II, COMBLE etc.). Предварительные результаты показывают, что основные ошибки одномерной версии модели INMCM связаны с недостаточным разрешением внутри пограничного слоя. Обсуждаются возможные способы программной и численной реализации параметризаций.

Литература:

1. Volodin, E. M. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // Climate dynamics, 49(11), 3715-3734.
2. J. Han, M. L. Witek, J. Teixeira, et al. Implementation in the NCEP GFS of a hybrid eddy-diffusivity mass-flux (EDMF) boundary layer parameterization with dissipative heating and modified stable boundary layer mixing. Weather Forecast., 31(1):341–352, 2016.

Математическая модель приземного турбулентного электродного эффекта с учётом поглощения аэроионов в слое ниже высоты шероховатости подстилающей поверхности

Дмитриев Э.М.

Геофизическая обсерватория "Борок" ИФЗ РАН, Борок, Россия
eldar@borok.yar.ru

Ключевые слова: моделирование, электродный эффект, атмосфера, аэроионы, высота шероховатости

Электрическое состояние слабоионизированной приземной атмосферы формируется электродным эффектом, приводящим к зависимости электрических характеристик от расстояния до электрода (земной поверхности) ввиду отталкивания от него одноименно заряженных аэроионов [1]. Классический приземный электродный эффект описывается краевой задачей для системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка для электрического поля $E(z)$ и концентраций положительных и отрицательных аэроионов $n_{\pm}(z)$ как функций высоты z с граничным условием $n_{\pm}(0)=0$. При $z \rightarrow \infty$ задаётся стремление искомых функций к их равновесным значениям.

В случае турбулентного электродного эффекта учёт турбулентной диффузии приводит к дифференциальным уравнениям 2-го порядка для $n_{\pm}(z)$ и необходимости задания дополнительного граничного условия. Обычно задаются граничные условия $n_{\pm}(h)=n_{\pm}(h)=0$ на высоте равной высоте шероховатости земной поверхности h [1], ниже которой турбулентная диффузия отсутствует. Однако, постановка таких граничных условий до сих пор не имеет строгого физического обоснования, а также не может быть проверена прямыми натурными наблюдениями.

Ранее в работе [2] была рассмотрена краевая задача для турбулентного электродного эффекта в области $z>0$, в предположении, что при $z<h$ коэффициент турбулентной диффузии равен нулю, но имеет место молекулярная диффузия. В модели, представленной в данном докладе, дополнительно учитывается поглощение аэроионов в слое $z<h$. Приводятся примеры численных решений соответствующей краевой задачи с граничными условиями $n_{\pm}(0)=0$, $n_{+}(0)=N$ для различных значений N . Показано наличие тонкого пограничного слоя вблизи земной поверхности, ввиду чего решение задачи в области $z>h$ оказывается слабо зависящим от величины N .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00053) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2022-0025.

Литература:

1. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог. Издательство ТРТУ, 1998. 123 с.
2. Дмитриев Э.М. Модель приземного турбулентного электродного эффекта, учитывающая процессы ниже параметра шероховатости подстилающей поверхности // Геофизические исследования. 2020, Т. 21, № 1, С. 50–60. DOI: 10.21455/gr2020.1-4

Моделирование формирования городского острова тепла в московской агломерации с помощью мезомасштабных климатических моделей COSMO-CLM и WRF

Докукин С.А.¹, Тихоненко Н.Д.^{1,2}, Гинзбург А.С.¹

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

²НПЦ «Мэн Мейкер», Москва, Россия

dokukinsa@ifaran.ru

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, тепловое загрязнение, городской остров тепла, московская агломерация, мезомасштабные климатические модели, COSMO, WRF

Деятельность людей на урбанизированных территориях приводит к выделению антропогенных потоков тепла. В крупных агломерациях в результате жизнедеятельности людей выделение антропогенных потоков тепла столь значительное, что над городом формируется городской остров тепла и сухости.

Для изучения формирования и характеристик городского острова тепла могут быть использованы различные климатические модели. Моделирование с помощью климатической модели COSMO-CLM со схемой TERRA-URB выявило взаимное влияние скорости ветра и интенсивности городского острова тепла в московской агломерации~[1]. Исследование климата Дели показало, что среди рассматриваемых в работе схем моделирование с помощью климатической модели WRF со схемой Urban Canopy Model позволяет наилучшим образом воспроизвести интенсивность и распределение городского острова тепла~[2].

Для достоверности результатов моделирования городского климата важно понимать, насколько отличаются характеристики городского острова тепла в разных климатических моделях при сходных климатических и погодных условия. В данной работе анализируется формирование городского острова тепла в московской агломерации с помощью моделей COSMO-CLM со схемой TERRA-URB и WRF со схемой Urban Canopy Model.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер 1021032424681-6-1.5.10;1.5.8;1.6.19.

Литература:

1. Гинзбург А.С., Докукин С.А. Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 53-66. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010053>.
2. Bhati, S., Mohan, M. WRF-urban canopy model evaluation for the assessment of heat island and thermal comfort over an urban airshed in India under varying land use/land cover conditions // Geosci. Lett. (2018) 5, 27, <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0126-7>.

Моделирование процессов теплообмена в воздушном потоке, несущем капли над взволнованной водной поверхностью

Дружинин О.А.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
druzhinin@iffran.ru

Ключевые слова: взволнованная поверхность, воздушный поток, капли, теплообмен, численное моделирование

Мелкомасштабные процессы вблизи границы раздела воздушной и водной сред определяющим образом влияют на обмен теплом и влагой между атмосферой и гидросферой. Их корректная параметризации необходима для использования в крупномасштабных моделях прогноза погоды и климата [1]. Пограничный слой над взволнованной водной поверхностью как правило характеризуется наличием капель брызг [2,3]. Одним из подходов оценки потоков с учетом капель является численное моделирование [4,5]. В настоящей работе исследованы процессы обмена явным и скрытым теплом в турбулентном воздушном потоке, несущем солёные капли над взволнованной водной поверхностью. Рассмотрены два различных случая температур воздуха и поверхности воды, характерных для условий полярного и тропического циклонов. Использована численная модель, где уравнения для полей скорости, температуры и влажности воздуха решаются в эйлеровой формулировке одновременно с интегрированием уравнений для скоростей, температур и масс отдельных капель. Показано, что в условиях тропического циклона потоки явного и скрытого тепла от капель к воздуху, противоположны по знаку, капли испаряются и охлаждают воздух. При этом поток скрытого тепла преобладает над потоком явного тепла. В условиях полярного циклона знаки обоих потоков положительны, капли увлажняют и нагревают воздух, и преобладает поток явного тепла. В обоих случаях полный поток тепла (энтальпии) от капель к воздуху положителен и растет с увеличением диаметра капель. С использованием спектров (распределения по диаметру капель) потоков и известной модельной функции генерации капель получена зависимость от скорости ветра вклада капель в потоки явного и скрытого тепла от океана в атмосферу в условиях тропических и полярных циклонов.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 24-27-00216 (разработка численных алгоритмов, обработка и теоретический анализ результатов). Численные расчеты выполнены на кластере ИПФ РАН (тема госзадания № FFUF-2022-0005).

Литература:

1. Thorpe S.A. Progress in Oceanography. 1995. V. 35. P. 315-352.
2. Andreas E.L., et al. J. Geophys. Res. 2010. V. 115. C12065.
3. Troitskaya Yu., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. Scientific Reports. 2017. V.7. P. 1614.
4. Peng .T, Richter D. J. Phys. Oceanogr. 2019. V.49. P. 1403-1421.
5. Druzhinin O.A. Boundary-Layer Meteorology. 2021. V. 178. P. 43–62.

Результаты комплексного полевого эксперимента по исследованию субмезомасштабных когерентных структур в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое над степной поверхностью

Зайцева Д.В.¹, Люлюкин В.С.^{1,2}, Шишов Е.А.¹, Кузнецов Д.Д.¹

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

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
zaycevadvg@gmail.com

Ключевые слова: устойчивый атмосферный пограничный слой, содар, когерентные структуры

В работе представлены результаты комплексного полевого эксперимента по исследованию когерентных турбулентных структур в устойчивом атмосферном пограничном слое с использованием многоточечных содарных измерений. Эксперимент был проведен в августе 2024 г в рамках экспедиционных исследований Института физики атмосферы на Цимлянской научной станции в Ростовской области. Измерительная сеть располагалась на однородной степной поверхности и состояла из трёх измерительных пунктов, удаленных друг от друга на расстояния 200–400 метров. В двух точках были расположены одноантенные доплеровские содары, измеряющие профили эхо-сигнала и вертикальной компоненты скорости ветра. В третьей точке располагались трёх-антенный содар, измеряющий профили трех компонент скорости ветра, микробарограф, температурный профилемер, а также ультразвуковые термометры-анемометры на трёх уровнях мачты (2, 10 и 30 м).

В работе представлены результаты анализа параметров субмезомасштабных когерентных структур, зарегистрированных в ходе комплексных измерений. Развёртки содарного эхо-сигнала (эхограммы) анализировались совместно с временными рядами приземного давления и мачтовых измерений скорости ветра и температуры. Были получены оценки пространственных и временных масштабов для различных типов структур, проанализированы условия их наблюдения. Скорость и направление движения структур были сопоставлены с данными о вертикальном профиле ветра. Благодаря использованию комплекса измерений были получены данные о корреляции между временными вариациями различных метеорологических параметров в присутствии волновых и вихревых структур.

Исследование турбулентных структур при обтекании естественных эоловых форм рельефа

Ильина Д.Ю.¹, Малиновская Е.А.²

¹*Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва, Россия*

²*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

ilina.diu@ispras.ru

Ключевые слова: обтекание ветром естественных эоловых форм рельефа, дюны, турбулентные структуры

Существенный вклад минерального пылевого аэрозоля в состав воздуха вносят аридные и семиаридные территории. Пылевой аэрозоль, представляющий собой частицы размером порядка $\sim 10^{-6}$ м, поднимается с поверхности под воздействием конвективно-турбулентных движений воздуха на высоту нескольких километров. В условиях опустынивания, характерных для Калмыцкой республики, восточной части Ставропольского края и других территорий России, эти процессы могут усиливаться. Механизмы эмиссии пылевого аэрозоля связывают с турбулентными структурами, которые образуются вблизи поверхности естественного эолова рельефа - песчаных дюн [1].

Моделирование обтекания проводится с помощью программного комплекса с открытым исходным кодом OpenFOAM. Геометрия выбранной дюны вблизи места комплексных полевых измерений (пос.Нарын-Худук, Калмыкия, июль-август 2024 г.) на основе измерений воссоздана в виде STL средствами Blender 3.6 и 4.2. Построена гибридная пространственная сетка для расчетной области со стороной 60 м, охватывающая дюну целиком. Рассматривается ветер, обдувающий дюну со скоростью 5 м/с с северной, южной и западной сторон. Высота холма (~ 3.5 м), а также характеристики потока, обуславливают наличие при такой скорости ветра отрыва за гребнем дюны, возникновение зоны рециркуляции. Использовались решатели SimpleFoam, pimpleFoam для нестационарных уравнений Навье-Стокса с условием прилипания на поверхности с моделью турбулентности k-epsilon и пристеночными функциями. Проведено сравнение с реализацией для модели турбулентности Ментера (k-omegaSST) и Спаларта-Аллмараса.

При изменении направления и скорости ветра отмечается изменение размеров циркуляционной зоны, перераспределение турбулентной энергии у поверхности, что влияет на интенсивность диффузионных процессов переноса. Меняется профиль скорости ветра, что определяет интенсивность массопереноса сальтирующих частиц и связанный с этим процесс эмиссии.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда – проект №23–27–00480.

Литература:

1. Chkhetiani. O.G. et al. Analysis of mineral aerosol in the surface layer over the Caspian lowland desert by the data of 12 summer field campaigns in 2002. –2020. Atmosphere. 12(8). p.985.
2. Louge M. Y. et al. Evolution of turbulent boundary conditions on the surface of large barchan dunes: Anomalies in aerodynamic roughness and shear velocity, aeolian threshold, and the role of dune skewness //Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2024. – Т. 129. – №. 9. – С. e2023JF007599.

О влиянии территории подвижных песков Калмыкии на температурный режим в окрестности

Калинин С.Д.¹, Козлов Н.О.¹, Малиновская Е.А.², Зайцева И.В.¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

nikitagarbuzko@gmail.com

Ключевые слова: Калмыкия, опустыненные территории, ветер, температура

Различие условий нагрева поверхности и массопереноса частиц у поверхности влияют на температурный режим.

Сравниваются результаты измерений ветровых и температурных параметров в двух пунктах на расстоянии 200 метров друг от друга (Калмыкия, июль, 2024 г.). В первой точке на подвижных песках проводились комплексные измерения Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, в том числе, с использованием ультразвуковых анемометров Metek uSonic-3 Scientific (2 и 10 м) [1]. Во второй точке установлена метеостанция WeatherStation Ventusw150 на ровной поверхности с низкой растительностью на высоте 2 м. Рассчитан «HeatIndex» для определения влияния влажности на ощущение температуры человеком [2].

Сравнение скоростей ветра и температуры воздуха на территории песчаном (усредненные данные анемометра за 5 и 10 минут) и степном участках показывают, что вблизи их границы эпизодически возникают усиления скорости ветра на 1-2 м/с и возрастание температур воздуха днем до 15:00. Пункт измерений в степи была расположена таким образом, что преобладающее направление ветра было от местности подвижных песков.

Почва в степи нагревалась меньше, однако температура воздуха оказалась в среднем выше на 3-4°C. Вероятно, преобладающий в эти дни северо-восточный ветер, дующий со стороны бархана, переносил теплые массы воздуха в сторону степи. Атмосферное давление, фиксируемое на территории степи, оказалось меньше, чем на песках, что является одной из причин усиления скорости ветра. Следует отметить, что в условиях слабых ветров вследствие особенностей рельефа, прогрева земной поверхности и возникновения конвективных потоков воздуха и неоднородном прогреве поверхности может возникать тепловой ветер [3], который способствует переносу аэрозоля.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФА им. А. М. Обухова РАН за полезные советы и возможность участия в измерительной кампании 2024г.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда – проект №23–27–00480.

Литература:

1. Шишов Е.А. Соленая О.А. Чхетиани О.Г. Азизян Г.В. Копров В.М. «Многоточечные измерения температуры и ветра в приземном слое». Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 286-297.
2. Rothfusz L. P. The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). – 1990.
3. Чхетиани О.Г., Калашник М.В., Ингель Л.Х., Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2013г., том 49, № 2, с. 137–143.

Микроструктура турбулентности в нижнем слое атмосферы

Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

kovadlo2006@rambler.ru

Ключевые слова: турбулентность, масштабы, энергетический спектр, пульсации

Настоящая работа направлена на обсуждение результатов исследований микроструктуры несущего потока воздуха, структурированного крупномасштабными пульсациями скорости ветра на разных высотах над подстилающей поверхностью в пределах пограничного слоя атмосферы. Определенный интерес представляет генерация температурных пульсаций на разных высотах в микролинейных масштабах в задачах, связанных с распространением световых волн в атмосфере.

Для исследования микроструктуры турбулентности привлекались собственные данные измерений турбулентных характеристик, а также данные ВММ (г. Обнинск) микрометеорологических наблюдений в пограничном слое атмосферы до высоты 301 м при ясном небе (при общей облачности меньше 2 баллов).

Получены характерные масштабы неоднородностей температуры в линейном диапазоне характерных изменений взаимного коэффициента корреляции (от 0,6 м до 25 м). Получены зависимости энергетических характеристик пульсаций от их масштаба в диапазоне менее 25 м, где микроструктура приобретает случайный характер. Обсуждаются процессы структуризации мелкомасштабной турбулентности для различных атмосферных условий. Показано, что в диапазоне от 1 м до 36 м теряется структурирующее действие ветровых пульсаций на температурные при устойчивой стратификации при $Ri \sim 0,2$ и ясном небе на высоте 16 м над подстилающей поверхностью. Внутри этого линейного диапазона происходит интенсивное перемешивание, контраст температурных неоднородностей снижается, теряется синхронизация с ветровым фоном. «Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10043, <https://rscf.ru/project/24-72-10043/>».

Исследование термической структуры необитаемых городских ландшафтов в высоких широтах

Константинов П.И.¹, Коспанов А.А.¹, Долгих А.В.², Тимажев А.В.³

¹Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kostadini@mail.ru

Ключевые слова: климат города, городской остров тепла, Арктика

В настоящее время вопросы термического воздействия антропогенно измененных территорий на региональный климат изучаются весьма активно. Так, города, расположенные в высоких широтах, невелики по размерам, занимают незначительную часть общей территории и не оказывают заметного влияния на региональные атмосферные процессы. Оценка и прогнозирование микроклимата и экологии в таких городах и их окрестностях является задачей определения статистических характеристик стратифицированных турбулентных течений с пространственной детализацией вплоть до масштабов, сравнимых с масштабами отдельных зданий, и такие исследования проводились в отечественной практике.

Однако, пока в литературе остается без ответа фундаментальный вопрос: "МОЖЕТ ЛИ НЕОТАПЛИВАЕМЫЙ И НЕЖИЛОЙ РАЙОН СОЗДАВАТЬ СВОЙ "ОСТРОВ ТЕПЛА?" и если да, насколько он менее интенсивный, нежели у обитаемых районов?

В рамках настоящего исследования обсуждается методика сбора данных о микроклимате таких населенных пунктов Арктической зоны в холодный сезон 2023-2024 гг, модельные эксперименты с помощью WRF-ARW, ENVI-met и первые экспериментальные результаты для нежилых районов г.Воркута, респ. Коми как наиболее масштабного населенного пункта, обладающего необходимыми особенностями для изучения микроклиматической изменчивости.

Влияние урбанизации на атмосферу Санкт-Петербурга: численные эксперименты с различными параметризациями городского полога

Ладохина Е.М.^{1,2,3}, Рубинштейн К.Г.^{4,5}

¹ООО «МикроСтеп-МИС», Санкт-Петербург, Россия

²Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Санкт-Петербург, Россия

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

⁴Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

⁵Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

katur.job@mail.ru

Ключевые слова: модель WRF-ARW, Санкт-Петербург, параметризации городского полога, SLUCM, BEP/BEM

Настоящее исследование фокусируется на применении различных методов параметризации городского полога в численной модели WRF-ARW для исследования влияния урбанизации на атмосферу Санкт-Петербурга. Для адекватного представления подстилающей поверхности города в модели использовались данные портала WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools). Эти данные позволяют охарактеризовать многообразие городских поверхностей в мезомасштабной модели ограниченным числом типов с использованием концепции локальных климатических зон [1]. Полученные таким образом слои включают в себя детальную информацию о распределении типов городской подстилающей поверхности с пространственным разрешением 0,6 км, а также ряд важных параметров, характеризующих городскую застройку: доля урбанизированной поверхности, плановая площадь застройки, средняя высота зданий, стандартное отклонение высоты зданий, индекс фронтальной площади и распределение высот зданий на высотах в слое 0–75 м.

Численные эксперименты с тремя различными по степени сложности параметризациями городского полога [2], а также эксперимент с выключенной городской параметризацией, проведены для случая проявления летнего городского острова тепла (ГОТ) высокой интенсивности 3 июня 2021 г. Показано, что более сложные параметризации городского полога дают лучшие результаты в условиях интенсивного ГОТ:

- наименьшая абсолютная ошибка прогноза приземной температуры (1.66°C) достигнута в эксперименте с использованием параметризации выделения антропогенной энергии зданий (BEP);

- наименьшие ошибки прогноза скорости приземного ветра и относительной влажности получены в эксперименте с BEP, объединенной с моделью энергопотребления зданий BEM (0.91 м/с и 7.65% соответственно).

Особенности воспроизведения ГОТ в численных экспериментах с BEP за разные сезоны рассмотрены на примере 2021 г.

Литература:

1. Stewart I.D., Oke T.R. Local climate zones for urban temperature studies // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2012. V. 93, N 12. P. 1879–1900.
2. Chen F., Kusaka H., Bornstein R., Ching J., Grimmond C.S.B., Grossman-Clarke S., Loridan T., Manning K.W., Martilli A., Miao S., Sailor, D.J. The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems // Int. J. Climatol. 2011. V. 31. P. 273–288.

Определение термоконвективных структур в потоке данных

Малиновская Е.А.¹, Калинин С.Д.^{2,1}, Зайцева И.В.^{2,1}

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

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия
fixinit8@gmail.com

Ключевые слова: конвекция, база образов, рэмп-структуры, нейронная сеть

Восходящие движения воздуха на опустыненных территориях способствуют образованию пылевого субмикронного аэрозоля [1,2]. Эти процессы сопровождаются флуктуациями скорости и температуры, формирующими когерентные структуры, называемые рэмпам. Количество и амплитуда рэмпов определяют свойства теплового потока, их характеристики могут указывать на условия неустойчивости, возникающей из-за температурного прогрева поверхности. Их временные масштабы различны, проявляется свойство самоподобия, поэтому необходима автоматизация обработки объемных данных для исследования таких структур. Определение рэмп-структур позволит использовать автоматизацию процессов обработки больших объемов высокочастотных измерений и получения данных об их статистических распределениях по размерам и интенсивности, необходимых для оценок интенсивности и скорости вертикального выноса пылевого аэрозоля с аридных и субаридных территорий. Цель данного исследования заключается в сравнении алгоритмического и нейросетевого методов в поиска рэмп-структур.

Два метода поиска тестировались на данных температуры (частота фиксации 1000 Гц), полученных в полевых условиях (2023 г., Калмыкия) с использованием специальных проволочных датчиков. Первый – это статистическая обработка с фильтрацией. Второй – представление рэмп-структур в виде двумерных массивов для распознавания с помощью нейронной сети. Обучение двухслойной нейронной сети на базе около 1000 изображений дало ошибку 12%. Нейронная сеть позволяет определять рэмп-структуры трех типов: вершинами вверх, вершинами вниз и не являющиеся рэмпам. Нейронная сеть выявляет в три раза больше рэмп-структур по сравнению с алгоритмическим методом, включая новые мелкие рэмпы с длительностью около 0,1 с. Алгоритмический метод ориентирован на поиск рэмп-структур близкого масштаба. Поэтому возможно его использование, как отдельно, так и совместно с нейронной сетью.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда – проект №23–27–00480.

Литература:

1. Krishnamurti R., Howard L. N. Large-scale flow generation in turbulent convection // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1981. Vol. 78(4). P. 1981–1985. doi: 10.1073/pnas.78.4.198.
2. Chkhetiani, O. G., Gledzer, E. B., Artamonova, M. S., Iordanskii, M. A. Dust Resuspension under Weak Wind Conditions: Direct Observations and Model // Atmospheric Chemistry and Physics, 2012. V. 12(11). P. 5147–5162. doi: 10.5194/acp-12-5147-2012.

Полевой эксперимент по установлению свойств песчано-воздушной среды с использованием звуковой фиксации

Малиновская Е.А.¹, Максименко Л.О.¹, Козлов Н.А.^{2,1}, Калинин С.Д.^{2,1}

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

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

elen_am@inbox.ru

Ключевые слова: конвективные структуры, неоднородность поля давления, звуковые волны, Марсоход «Персеверанс», звуковая фиксация, ветер, удары частиц

Известно, что при ветровых условиях основой для возникновения вихря являются конвективные ячейки вблизи поверхности, где поднимается теплый воздух и происходит падение давления. Прохождение вихря идентифицируются с помощью барометра и проявляются в виде резкого провала в локальном временном ряду давления. Движение воздуха, наличие конвективных структур создает неоднородность поля давления. Поэтому движущаяся воздушная среда создает звуковые волны, которые могут быть связаны с параметрами воздуха. Так, по звукам, записанным Марсоходом «Персеверанс» во время движения марсианского пылевого вихря [1], определены корреляции звуковых колебаний различных частот с данными барометра, термометра и анемометра. При звуковой фиксации ударов частиц о проводящий контейнер выявлено, что на низких частотах определяется звук ветра, а на высоких удары частиц [2].

Поставлена задача исследования возможности звуковой фиксации динамических процессов воздушной среды в естественных условиях интенсивных конвективных и турбулентных движений у поверхности параллельно с комплексными непрерывными измерениями (Калмыкия, подвижные пески).

Использовались для звуковой фиксации колебаний воздуха (высоты: 1 м и 5 см, частота записи 16кГц):

- низкочастотный Vibromic Lite 180;
- стереомикрофон Tinymics на базе Primo EM258;
- Электромагнитный микрофон/детектор EMF;
- Портативный рекордер zoom 6/BLK.

Проведено сравнение амплитуд колебаний звуковых файлов и с данными скорости ветра и температуры (анемометры Metek uSonic-3) и напряженности эл.поля (флюксометр, НПО Тайфун ПН-2014М).

Для нескольких временных интервалов на различных частотах, полученные с использованием спектров звуковых файлов и дискретного вейвлет преобразования, отмечается общее сходство динамики как с метеопараметрами, так и для всплесков электрического поля. Коэффициенты корреляции для некоторых событий достигают значений 0.85.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда – проект №23–27–00480.

Литература:

1. Murdoch N. et al. The sound of a Martian dust devil //Nature Communications. – 2022. – Т. 13. – №. 1. – С. 7505.
2. Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г. Звуковой фиксинг эолового выноса // ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА. Сборник тезисов. 2022. С.134.

Классификация условий накопления и рассеяния ЗВ в пограничном слое атмосферы по данным измерений температурной стратификации и ветра

Миллер Е.А.¹, Лукьянов А.Н.¹, Баранов Н.А.²

¹Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия

²Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия
tissary@gmail.com

Ключевые слова: температурные инверсии, пограничный слой атмосферы, пнс, дистанционное зондирование

Построение детерминированной системы контроля диффузии в планетарном пограничном слое загрязняющих веществ (ЗВ) от индустриального предприятия, когда источников больше тысячи и площадь их размещения измеряется в квадратных километрах, затруднительно. По этой причине актуальна проблема выявления связей между характеристиками эмиссий промышленных газов, с контролем ЗВ в заданных точках мониторинга и параметрами атмосферы в ППС, которые можно контролировать в режиме реального времени доступными контактными и дистанционными средствами измерений. Другими словами, необходимы методы, которые позволяют определить, в каких условиях в результате эмиссии от источника «А» будет зафиксирована концентрация «С» в точке контроля «Б».

К характеристикам условий накоплений и рассеяния ЗВ относят параметры температурно-ветровой стратификации такие как: высота слоя перемешивания, характеристики температурной инверсии, метеорологический показатель рассеивания примеси и загрязнения приземного воздуха, категории устойчивости атмосферы и др. [1, 2]. На основе статистического анализа данных экспериментальных исследований, проведенных в различных промышленных агломерациях, в данной работе определены типовые условия накопления ЗВ или, другими словами, НМУ (в терминах ФЗ № 96), критериями которых являются характеристики температурной стратификации и ветра, вычисляемые по данным прямых измерений. В качестве критериев НМУ были выбраны нижняя граница инверсий и ветер на уровне 20 метров от поверхности земли.

Набор параметров НМУ позволил классифицировать условия накопления ЗВ в зависимости от характеристик источников (низкий/высокий и холодный/горячий) с учетом особенности расположения точки контроля (завод, город, пост на границе санитарной зоны). Кроме того, предложена методика препроцессинга данных прямых измерений профиля температуры и приземного ветра для их использования в модели оценки поля концентрации ЗВ от точечного источника в условиях температурной инверсии и без нее.

Литература:

1. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Глазкова А.А., Захарова П.В., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы. Труды ГМЦ России 2014 В. 351., 154-172.
2. РБ-046-21, Руководство по безопасности при использовании атомной энергии, Мониторинг гидрологических, метеорологических и аэрологических условий в районах размещения объектов использования атомной энергии. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2021

Вихревые модели плоских турбулентных течений, ограниченных стенками

Миронов В.Л., Миронов С.В.

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия
mironov@ipmras.ru

Ключевые слова: турбулентность, вихревая вязкость, пристеночное течение, течение Куэтта, течение Пуазейля

Представлены теоретические модели плоских турбулентных потоков на основе системы уравнений для вихревой жидкости [1], учитывающих как продольное движение, так и вращение вихревых трубок. Используя простую модель турбулентной вязкости (гипотеза Буссинеска), получены аналитические выражения для профилей средней скорости установившихся плоских турбулентных течений газов и жидкостей. В частности, рассмотрены пристеночные течения в пограничном слое, а также течения Куэтта, Пуазейля и комбинированные течения Куэтта - Пуазейля [2,3]. Во всех этих случаях рассчитанные профили средней скорости турбулентного потока хорошо согласуются с экспериментальными данными и результатами прямого численного моделирования.

Литература:

1. V.L. Mironov, S.V. Mironov, Generalized sedeonic equations of hydrodynamics, European Physical Journal Plus, 135(9), 708 (2020).
2. V.L. Mironov, S.V. Mironov, Vortex model of plane Couette flow, Fluids, 8(6), 165 (2023).
3. V.L. Mironov, S.V. Mironov, Vortex model of plane turbulent air flows in channels, Advances in Aerodynamics, 6:8 1-17 (2024).

Сравнение совместных распределений измеренных пульсаций метеопараметров в городском каньоне с данными вихреразрешающего моделирования

Пашкин А.Д.^{1,2,3}, Мортиков Е.В.^{3,4}, Репина И.А.^{1,3,4}, Богомолов В.Ю.^{2,3}, Тельминов А.Е.²,
Смирнов С.В.²

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

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский
вычислительный центр, Москва, Россия

⁴Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

artemp@ifaran.ru

Ключевые слова: турбулентность, неоднородная поверхность, городской каньон, статистические моменты, вихреразрешающее моделирование

В докладе представлено сравнение совместных распределений измеренных пульсаций метеопараметров с результатами расчёта вихреразрешающей модели. Такое сравнение будет способствовать выявлению когерентных структур. Измерительная площадка находится в условиях, подобных городскому каньону. Измерения проводятся на базе геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск) с использованием измерительной системы из 5 акустических анемометров АМК–03 совместного производства ИМКЭС СО РАН и ООО "Сибаналитприбор" (Россия) [1]. Для вихреразрешающей модели, разрабатываемой в Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ им. М.В. Ломоносова, создана подробная карта высот зданий и растительности, окружающих измерительную площадку ИМКЭС.

Литература:

1. Пашкин А.Д. и др. Связь статистических характеристик турбулентности с когерентными структурами... // Процессы в геосредах. 2021 № 1 (27). С. 1020–1027.

Параметризация пограничного и приземного слоев атмосферы при моделировании устойчивых ситуаций в Арктике, для моделей прогноза погоды COSMO-Ru и ICON-Ru

Перов В.Л., Никитин М.А., Татаринovich Е.В.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

veniamin.perov@mail.ru

Ключевые слова: устойчивый пограничный слой атмосферы

Описание турбулентности в современных моделях прогноза погоды является важной и не до конца решенной задачей. Основные трудности при решении этой задачи связаны с сильной нелинейностью уравнений. Нелинейные взаимодействия между движениями на разных масштабах генерируют в атмосфере нерегулярные течения. Модели турбулентности, применяемые для моделирования таких сложных течений, должны быть способны учитывать различные влияния на разных масштабах. Однако, осреднения Рейнольдса уравнений Навье-Стокса, используемые в моделях прогноза погоды, не делают различия между масштабами, смешивая их вместе. В отличие от этого подхода, спектральный алгоритм [1,2] учитывает зависимость атмосферных процессов от масштабов. В докладе мы рассматриваем применение спектрального алгоритма для турбулентных течений в пограничном слое атмосферы (ПСА), обращая основное внимание на трудные для моделирования ситуации с устойчивой и сильно устойчивой температурной стратификацией. Устойчивая стратификация ПСА приводит к возникновению пространственной анизотропии турбулентности, т. е. к уменьшению турбулентного перемешивания по вертикали и его увеличению по горизонтали. В рассматриваемом спектральном алгоритме, поля скорости и температуры отображаются на квази-Гаусовы поля, чьи гармоники описываются уравнениями Ланжевена. Для расчета параметров отображения используется процедура последовательного исключения мелкомасштабных мод скорости и температуры, что приводит к уравнениям для более крупномасштабных гармоник. При распространении процесса последовательного исключения мелкомасштабных мод до самых больших масштабов спектральный алгоритм дает новую модель турбулентности. Эта модель была применена в схеме пограничного слоя атмосферы в моделях прогноза погоды COSMO-Ru и ICON-Ru для Арктической зоны. Для расчета турбулентных потоков в приземном слое использовался модернизированный вариант, предложенный ранее.

Литература:

1. Sukoriansky, S., Galperin, B., and Perov, V.: Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to atmospheric boundary layers over sea ice, Bound.-Layer Meteor., 117, 231-257, 2005.
2. Ефремов С.В., Никитин М.А., Перов В.Л. Применение спектрального алгоритма для вычисления коэффициентов турбулентности в модели COSMO-Ru, при прогнозировании устойчивых ситуаций. Труды Гидрометцентра России. – 2019. – Вып. 373. – С. 1–13.

Влияние плёнки естественных примесей на тепломассообмен вблизи границы раздела «вода-воздух»

Плаксина Ю.Ю., Родыгин В.И., Пуштаев А.В., Руденко Ю.К., Винниченко Н.А., Уваров А.В.
Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия
yuplaksina@mail.ru

Ключевые слова: плёнка естественных примесей, тепломассообмен в приповерхностном слое, теневой фоновый метод

Исследование энергообмена на границе раздела воды с воздухом является одной из ключевых задач геофизики [1]. Немалую роль в процессе энергообмена между двумя средами играют граничные условия на разделяющей поверхности, зависящие от её состояния. Как известно, в природе не существует абсолютно чистой воды, за исключением деионизированной, поэтому на поверхности воды всегда образуется плёнка из естественных примесей. Эта плёнка, в отличие от хорошо известных загрязнений, при наличии которых на поверхности образуются слики, обладает специфическими свойствами – она может рваться за счёт механического и теплового воздействия, восстанавливаться за счёт адсорбции из объема и затягиваться при прекращении действия на неё. В настоящее время можно считать установленным фактом, что наличие плёнки естественных примесей в воде приводит как к блокировке массообмена «поверхность-объем», так и к исчезновению конвекции по механизму Марангони [2], но не препятствует движению при наличии тангенциальных напряжений на поверхности.

В работе в лабораторных условиях проводились эксперименты по изучению и сравнению граничных условий, возникающих на поверхности воды и этанола в процессе тепломассообмена с окружающей средой. В этаноле, в отличие от воды, поверхность не блокируется естественными примесями. Благодаря новым методам, используемым в работе, таким как теневой фоновый метод (BOS) в новой модификации и ИК-термография, удалось разрешить мелкомасштабную структуру поверхностного слоя воды и этанола и оценить толщину слоя, в котором тепло передаётся молекулярным путём. В этаноле, в отличие от воды, этот слой ничтожно мал. Было проведено численное моделирование с различными граничными условиями на поверхности. При подстановке корректных граничных условий результаты моделирования хорошо совпадают с экспериментальными измерениями и литературными данными.

Работа была выполнена с использованием оборудования, приобретённого за счёт средств Программы развития Московского университета.

Литература:

1. Голицын, Г. С. Статистика и динамика природных процессов и явлений. Методы, инструментарий, результаты / Г.С. Голицын. – Москва : КРАСАНД. 2013. – 400 с. – ISBN 978-5-396- 00502-0.
2. Vinnichenko, N. A. Mobility of free surface in different liquids and its influence on water striders locomotion / N. A. Vinnichenko, Y. Y. Plaksina, K. M. Baranova et al. // Environmental Fluid Mechanics. — 2018. — Vol. 18, № 5. — P. 1045–1056.

Пространственная и временная изменчивость компонент радиационного баланса у поверхности Земли по натурным данным и данным реанализа, оценка параметрических связей с атмосферными факторами

Плахина И.Н.¹, Репина И.А.¹, Махоткин А.Н.²

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

²Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

inna@ifaran.ru

Ключевые слова: *солнечная радиация, подстилающая поверхность, баланс, временные вариации, корреляционные связи, облачность, влажность и температура в атмосфере, прозрачность*

Реальные (эмпирические) вариации составляющих коротковолнового и длинноволнового радиационного баланса у поверхности Земли и их колебания разного временного масштаба актуальны и важны в исследованиях климатических изменений. В наших работах систематически, на основе измерений актинометрической сети РФ, анализируются динамические текущие изменения коротковолновой солнечной радиации (0.4 - 4.0 мкм) (для значимых регионов территории РФ), с одновременными оценками динамики характеристик прозрачности атмосферы. Потоки длинноволновой радиации (4.0 – 100.0 мкм), восходящие и нисходящие, также весьма важны при анализе радиационного баланса у поверхности Земли, особенно в атмосфере высоких широт, где значимую часть года отсутствует приход солнечного (коротковолнового) излучения. Данные по раздельной регистрации длинноволновой радиации в атмосфере относительно малочисленны по сравнению с коротковолновыми компонентами солнечного излучения и в своём роде уникальны.

В докладе представляются 6-7 летние ряды вышеперечисленных данных для 3-х пилотных станций, расположенных на разных широтах. Это Каргополь (61.5 с.ш.; 39.0 в.д.), Самара (53.2 с.ш.; 50.25 в.д.) и Цимлянск (47.7 с.ш.; 42.1 в.д.). Период наблюдений с 2014 по 2019 гг (для Цимлянска до 2020 г). Анализируются связи с параметрами атмосферы и подстилающей поверхности: с температурой воздуха (t_a) и подстилающей поверхности (t_s), степенью покрытия неба облаками (N), а также альбедо. Получены степень корреляций (в том числе, множественных) и аппроксимационные зависимости потоков радиации от параметров приземного слоя. Использованы методики анализа синхронных эмпирических рядов. Полученные оценки интересны тем, что они показывают неплохое единообразие регрессионных коэффициентов для разных точек наблюдения, высокую выраженность связи длинноволновой радиации с температурой, и увеличение выраженности этой связи с севера на юг.

Взаимодействие атмосферы с неоднородной поверхностью по данным измерений и вихреразрешающего моделирования

Репина И.А.^{1,2}, Мортиков Е.В.^{2,1}, Дебольский А.В.^{2,1}, Чечин Д.Г.¹, Пашкин А.Д.¹, Артамонов А.Ю.¹,
Варенцов А.И.^{2,1}

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

²Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
repina@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, неоднородный ландшафт, вихреразрешающее моделирование

Важным направлением дальнейшего развития моделей Земной системы является разработка многомасштабных моделирующих систем, одним из критериев качества которых может служить их способность воспроизводить сложную картину атмосферных движений над реальной подстилающей поверхностью. Но учет поверхностных неоднородностей различного масштаба до сих пор является лишь частично решенной задачей. Особенно это касается турбулентного обмена над термически-неоднородной поверхностью.

В работе в качестве полигонов для исследования выбраны заболоченные территории и прибрежная зона. Исследуются области формирования турбулентных потоков, влияние термических контрастов на процессы в пограничном слое атмосферы. Установлено, что изменение температуры и альбедо подстилающей поверхности влияет на обменные процессы. И вклад каждого типа поверхности определяется его весовыми характеристиками.

Численное моделирование трехмерных нестационарных стратифицированных турбулентных течений с высоким пространственным разрешением и натурные наблюдения используются для статистического и теоретического анализа и разработки простых параметризаций, пригодных для включения в климатические и прогностические модели Земной системы. Использование результатов LES моделирования позволит напрямую оценить применимость параметризаций, используемых в моделях Земной системы для расчета потоков над термически-неоднородной поверхностью в зоне неоднородных ландшафтов.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 24-17-00155.

Вихреразрешающее моделирование морского пограничного слоя при холодном вторжении в эксперименте (COMBLE)

Силин Н.И.¹, Мортиков Е.В.^{1,2}, Дебольский А.В.^{1,3}, Чечин Д.Г.^{3,1}

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

sila.nikita@gmail.com

Ключевые слова: LES, микрофизика, пограничный, радиация

Вихреразрешающее моделирование - одно из важных направлений метеорологии, позволяющее численно воспроизвести мелкомасштабные процессы обмена в атмосфере. Несмотря на значительный прогресс в этой области, в настоящее время не все явления воспроизводятся численными моделями качественно. К таким процессам можно отнести часто встречающиеся холодные вторжения над морской поверхностью, при которых развиваются облака с осадками в виде дождя, снега и крупы.

Для улучшения численного прогноза погоды при холодных вторжениях был предложен эксперимент «COMBLE» (Geerts et al., 2022) - Cold air Outbreaks in the Marine Boundary Layer, предлагающий постановку численного эксперимента по воспроизведению случая холодного вторжения в акватории Норвежского моря 13 марта 2020 года. Для решения этой задачи была модернизирована вихреразрешающая модель пограничного слоя атмосферы ИВМ-МГУ (Kadantsev et al., 2021, Tkachenko et al., 2021, Voevodin et. al., 2023), в которую были добавлены одномоментная (Lin et al., 1983, Grabowski, 1999) и двумоментная (Seifert et al., 2001) модели микрофизики облаков, а также модель распространения радиации в атмосфере (Mlawer et al., 1997). Был проведен ряд численных экспериментов с различным пространственным разрешением и двумя микрофизическими параметризациями, результаты которых были сравнены с моделями других исследовательских центров, а также с фактическими данными, полученными со спутников.

Данные LES расчетов использовались для проверки и настройки одномерных моделей пограничного слоя и параметризаций облачности, используемых в крупномасштабных моделях прогноза погоды и климата.

Работа поддержана проектом темы ФНТП №124042700008-6 «Исследование процессов в геофизических пограничных слоях и создание новых подходов для их параметризации в моделях Земной системы» в рамках мероприятия «Усовершенствование глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений».

Оценка области воздействия на газообмен водоем-атмосфера в прибрежной зоне: на примере водного участка полигона “Карбон-Поволжье”

Согачев А.Ф.^{1,2}, Репина И.А.^{2,3}, Кожевникова М.В.⁴, Усманов Б.М.⁴, Прохоров В.Е.⁴

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Казанский (Поволжский) Федеральный университет

andrevsogachev@gmail.com

Ключевые слова: газообмен, область формирования потока, водные объекты

Водоёмы суши играют важную роль в газообмене между подстилающей поверхностью и атмосферой [1]. Но организация долгосрочных наблюдений за экосистемным обменом вдали от береговой линии сопряжена с определенными трудностями - обычно станции в той или иной степени подвержены влиянию береговых источников.

Для оценки качества данных в микрометеорологии важным фактором является оценка области воздействия на датчик (футпринт) [2]. В данной работе для оценки зоны воздействия на результаты измерений автоматической станции мониторинга эмиссии парниковых газов карбонового полигона “Карбон-Поволжье” (49,28N; 55,2694E), расположенной на акватории Куйбышевского водохранилища, была применена методика расчета футпринта, предложенная в работе [3]. Оценка футпринта достигается методом последовательной активации источников/поглотителей в ячейках модели атмосферного пограничного слоя и анализом их интегрального воздействия на ячейку расположения датчика с заданной высотой.

Оценки интегрального по направлению ветра футпринта и кумулятивного потока для станции с датчиками на высоте 4 и 10 м были получены для четырех направлений ветра по трансектам (север-юг) и (восток-запад) для источника, расположенного на поверхности (вода и почва). Наличие близлежащих к станции островов с растительностью при южном ветре и берега при северном способствует уменьшению области воздействия. Область воздействия при западном и восточном направлении ветра увеличена из-за преобладания водной поверхности для данных направлений. Максимальные значения футпринта для трансекты запад-восток в среднем в 4 раза меньше чем для трансекты север-юг. При южном направлении ветра около 90% информации приходит с водной поверхности на датчик на высоте 4 м. Для других высот и направлений ветра футпринт растянут по пространству затрагивая источники, расположенные на водной поверхности и на удаленных островах. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-17-00155.

Литература:

1. Репина И. А., Терский П.Н. и др. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований // Водные Ресурсы. 2022.
2. Leclerc M.Y., Foken T. Footprints in Micrometeorology and Ecology. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 2014.
3. Sogachev A., Lloyd J. Using a one-and-a-half order closure model of the atmospheric boundary layer for surface flux footprint estimation // Boundary-Layer Meteorol. 2004. V. 112.

Математическая модель деятельного слоя суши TerM: численное исследование гидрологического и углеродного циклов суши в условиях изменения климата

Степаненко В.М.¹, Медведев А.И.¹, Богомолов В.Ю.^{2,1}, Шангареева С.К.¹, Рязанова А.А.²,

Файкин Г.М.¹, Рыжова И.М.³, Суязова В.И.¹, Дебольский А.В.¹, Черненко А.Ю.⁴

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

³Факультет почвоведения, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

v.stepanenko@rcc.msu.ru

Ключевые слова: математическое моделирование, деятельный слой суши, гидрологический цикл, углеродный цикл

В докладе представлена схема деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ, вынесенная из модели Земной системы ИВМ РАН в автономный программный комплекс и дополненная рядом модулей для воспроизведения новых составляющих Земной системы. Полученный программный продукт именуется TerM (Terrestrial Model). Кратко излагается физико-математическая основа модели, основные черты программной реализации и примеры приложений в части воспроизведения составляющих гидрологического и углеродного циклов суши. Выделение блока деятельного слоя в отдельный программный комплекс способствует кардинальной экономии вычислительных ресурсов для решения задач по оценке влияния глобальных и региональных изменений климата на природные ресурсы (в т.ч. гидрологические), состояние экосистем, эмиссии климатически активных веществ с высокой пространственной детализацией. В рамках комплекса TerM ведётся разработка, валидация и калибровка новых параметризаций физических и биогеохимических процессов в автономном режиме для последующего внедрения в модель Земной системы ИВМ РАН.

Мезомасштабное и вихреразрешающее моделирование процессов обмена над термически неоднородной поверхностью на примере полигона Мухрино

Сюзова В.И.^{1,3,4}, Дебольский А.В.^{1,3,4}, Мортиков Е.В.^{1,2,3,4}

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

er-riad@mail.ru

Ключевые слова: неоднородность поверхности, турбулентный обмен, вихреразрешающее моделирование

Основной целью исследования является оценка влияния пространственной микромасштабной неоднородности на процессы обмена в атмосферном пограничном слое для болотного комплекса «Мухрино», типичного для Западной Сибири. В работе проведено исследование о возможности использования мезомасштабной модели WRF-ARW для получения информации о турбулентных характеристиках в условиях неоднородной болотной поверхности. Второй этап работы посвящен постановкам экспериментов с вихреразрешающей моделью, в которых рассматривается неоднородность поверхности, приближенная к характерным ее типам в болотном комплексе «Мухрино». Анализ используемых в модели WRF типов поверхности позволил заключить, что доля болот составляет около 10%, что не соответствует действительности. Поэтому доля болот была увеличена. Модель WRF при правильном учете характеристик поверхности демонстрирует успешные результаты воспроизведения показателей турбулентного обмена болотами. Для исследования неоднородности использована вихреразрешающая модель, разработанная в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН [1]. Создана конфигурация вихреразрешающей модели с типами поверхности, приближенными к наблюдаемым: «заболоченная ложбина» и «рям», входящих в состав болотного комплекса «Мухрино». Различия в характеристиках турбулентного обмена, обусловленные неоднородностью хорошо согласуются с наблюдаемыми различиями в точке «рям» и «заболоченная ложбина». Влияние неоднородности на структуру АПС в целом, оценено с использованием дисперсионного потока тепла. Дисперсионный поток тепла присутствует для случая однородной поверхности, что свидетельствует о недостаточной длине интервала осреднения. Тем не менее, при наличии неоднородности поверхности, замечается увеличение дисперсионного потока. Наличие неоднородности увеличивает абсолютное значение потока днем и уменьшает ночью. Описанную в работе конфигурацию вихреразрешающей модели можно использовать для изучения взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности с учетом ее неоднородности.

Литература:

1. Mortikov E. V., Glazunov A. V., Lykosov V. N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2019. – Т. 34. – №. 2. – С. 119-132.

Сравнение параметризаций городской поверхности различной степени сложности в модели COSMO на примере Московской агломерации

Тарасова М.А.^{1,2}, **Варенцов М.И.**^{2,1,3,4}, **Дебольский А.В.**^{2,4}, **Степаненко В.М.**^{2,3,4}

¹*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия*

³*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

⁴*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

mkolennikova@mail.ru

Ключевые слова: городская метеорология, городские параметризации, модели атмосферы

Для учета взаимодействия атмосферы с городской поверхностью в численных моделях используют параметризации различной степени сложности. В оперативной версии региональной модели COSMO 6.0, используемой в Гидрометцентре России для прогнозов погоды и климатических исследований, доступна только одна параметризация городской поверхности TERRA_URB [1], которая относится к наиболее простым балк-параметризациям. Нами выполнена работа по включению в модель COSMO более сложной однослойной модели городского полога TEB (Town Energy Balance) [2]. Обе городские параметризации основаны на концепции «городского каньона» и учитывают в качестве внешних параметров о городской среде значения средней высоты зданий в ячейке и расстояния между ними. Параметризация TERRA_URB лишь модифицирует параметры подстилающей поверхности в соответствии с особенностями застройки, в то же время параметризация TEB рассчитывает потоки уходящей коротковолновой и длинноволновой радиации с учетом многократного переотражения и затенения внутри каньона, а также турбулентные потоки тепла и влаги между поверхностью и атмосферой с учетом отдельных элементов каньона (крыши, стены, дороги). В докладе представлены результаты моделирования метеорологического режима Московского региона с шагом 1 км для августа 2022 года моделью COSMO с двумя параметризациями городской поверхности при одинаковом задании внешних параметров. Показаны различия в температуре воздуха, потоков явного и скрытого тепла, воспроизводимые двумя параметризациями, а также определены факторы, которые за эти различия отвечают. По данным наблюдений за температурой воздуха на сети метеостанций проведено сравнение качества воспроизведения городского острова тепла с использованием двух параметризаций различного уровня сложности.

Исследование выполнено в рамках Научно-исследовательской работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Работа по подготовке входных параметров для городских параметризаций выполнена в рамках проекта РНФ № 24-1700-155.

Литература:

1. Garbero V., Milelli M., Bucchignani E., Mercogliano P., Varentsov M., Rozinkina I., Rivin G., Blinov D., Wouters H., Schulz J.-P., Schättler U., Bassani F., Demuzere M., Repola F. Evaluating the urban canopy scheme TERRA_URB in the COSMO model for selected European cities // Atmosphere. 2021. V. 12 № 2.
2. Masson V. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models // Bound.-Lay. Meteorol. 2000. V. 94. P. 357–397.

Региональная система мониторинга энергообмена городского ландшафта с атмосферой г. Томск

Тельминов А.Е.¹, Варенцов М.И.^{2,3}, Кобзев А.А.¹, Капустин С.Н.¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

talexey@imces.ru

Ключевые слова: атмосферный приземный слой, турбулентность, энергообмен, региональная система мониторинга, урбанизированная территория

Рассмотрен опыт создания региональной системы мониторинга для исследования турбулентного энергообмена атмосферы с подстилающей поверхностью. Разработана оригинальная технология построения наблюдательной сети на базе ультразвуковых автоматических метеостанций АМК-04 отечественного производства. На основе разработанной технологии в г. Томск развернута сеть измерений характеристик взаимодействия атмосферы с поверхностью TomskFluxNet, включающая две городские и две фоновые точки измерений. Получены первые экспериментальные данные анализа результатов за отдельные месяцы. Продемонстрированы различия турбулентных потоков явного тепла и импульса - ключевых характеристик взаимодействия атмосферы с поверхностью - между различными городскими и фоновыми ландшафтами.

В перспективе данные, получаемые экспериментальной сетью TomskFluxNet, могут быть использованы для проверки, калибровки и улучшения физических параметризаций взаимодействия атмосферы с городской поверхностью для моделей прогноза погоды и климата.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 24-27-00300).

Оценка антропогенного потока тепла в течение отопительного периода на основе строительных норм и правил в городах Российской Федерации с населением не менее четырехсот тысяч человек

Фролькис В.А.^{1,2}, Евсиков И.А.^{1,3}

¹Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

VFrolkis@gmail.com

Ключевые слова: антропогенный поток тепла, городской остров тепла, административная и урбанизированная территория города

В России 16 городов с населением более 1 млн человек, в 21 городе проживает свыше 0,5 млн, в 11 городах от 400 до 500 тысяч человек. В течение отопительного периода в городах возникает антропогенный поток тепла (АПТ), который в зимний период сравним с инсоляцией, в плотно застроенных районах приводит к повышению температуры, может создавать интенсивную конвекцию и влиять на погоду.

Геоинформационные технологии привели к появлению методов оценки АПТ «снизу-вверх», когда АПТ вычисляется для каждого здания, городской АПТ получается суммированием по всем зданиям. На основе сервисов «OpenStreetMap», Яндекс.Карты и ГИС ЖКХ собрана информация о контурах зданий и этажности, она используется для построения моделей городской застройки. Используя Свод правил, для ограждающих конструкций и для зданий в целом определены их теплофизические свойства, а по разности температур внутреннего и наружного воздуха оценивается АПТ.

С разрешением 30×30 м² построены модели застройки 48 крупных городов РФ для их административных и урбанизированных территорий, так как площадь зданий в пределах административных границ занимает менее 9%, внутри урбанизированной территории порядка 30%.

На основе Свода правил реализованы три алгоритма оценки АПТ. Первый базируется на нормируемом значении сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, предъявляемых к ограждающим элементам зданий. Второй использует понятие удельной теплозащитной характеристики здания. В основе третьего лежит расчетное значение удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. АПТ оценивается по средней температуре наружного воздуха за отопительный период.

Антропогенная энергия в ПДж с административной территории по трем алгоритмам, равна: для Москвы 137,6, 222,0 и 294,3; для Санкт-Петербурга 82,8, 131,3 и 172,1; для городов с населением не менее 1 миллиона человек 14,1 – 31,1, 27,7 – 48,3 и 20,7 – 71,2; для городов с населением не менее 500 тысяч человек 4,13 – 17,4, 5,92 – 27,5 и 4,77 – 38,5.

Эмиссии метана неоднородным ландшафтом арктической тундры: влияние уровня болотных вод и температуры почвы

Чечин Д.Г.¹, Дрозд И.Д.¹, Кривенко Л.А.¹, Пашкин А.Д.¹, Репина И.А.^{1,2}, Токарева З.К.¹, Устинов Н.Б.¹

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

²Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

chechin@ifaran.ru

Ключевые слова: эмиссии метана, арктическая тундра, углеродный цикл, неоднородный ландшафт

Заболоченные тундровые полигональные ландшафты в Арктической зоне являются существенным природным источником метана, однако оценки региональных эмиссий с таких ландшафтов отличаются очень большой неопределенностью по причине малого числа наблюдений и большой пространственной неоднородности ландшафтов. Изучение влияния последней было основной целью полевых работ, проводившихся летом 2023 и 2024 гг. на острове Самойловский в дельте Лены. Измерения эмиссий камерным методом подтвердили, что наибольшие эмиссии наблюдаются в пониженных влажных центрах полигонов, а наименьшие - на валиках и сухих центрах полигонов. Это подчеркивает, что уровень болотных вод является важнейшим фактором, определяющим пространственную изменчивость эмиссий метана. Впервые на Самойловском был выявлен суточный ход эмиссий в центрах полигонов, который, наиболее вероятно, обусловлен суточным ходом температуры почвы. В оценках потока метана, сделанных с помощью метода турбулентных ковариаций (ТК) по данным пульсационных измерений в двух различных локациях, суточный ход выражен менее явно. Ранее суточный ход потока метана по измерениям методом ТК объяснялся суточной изменчивостью динамической скорости. Регулярная инфракрасная съемка температуры поверхности с помощью беспилотного летательного аппарата, позволила оценить распределения температуры поверхности внутри различных типов микроландшафта (центры влажных и сухих полигонов, валики, озерки), а также связать контрасты температур с составляющими теплового баланса, и оценить возможный разброс потока метана внутри одного типа микроландшафта, обусловленный температурой почвы. Результаты подчеркивают, что в основе развития методов апскейлинга эмиссий метана должно лежать адекватное описание пространственно-временной изменчивости таких характеристик ландшафта, как температура верхнего слоя почвы и уровень болотных вод.

Работы выполнялись при поддержке гранта РНФ № 22-47-04408 и госзадания ИФА РАН № 1022030400001-9.

Турбулентные флуктуации в АПС при устойчивой стратификации

Юшков В.П.

Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

vpvushkov@yandex.ru

Ключевые слова: турбулентность, флуктуации скорости звука, предельный переход, потенциально доступная энергия

В работе рассматривается связь флуктуаций потенциальной температуры и скорости звука σ_c^2 в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (АПС) с кинетической энергией вихревых турбулентных флуктуаций E_t и скоростью их диссипации ε_v . Проведённые расчёты ковариаций флуктуаций скорости звука и вертикальной компоненты скорости ветра показывают, что в устойчиво стратифицированном пограничном слое наблюдается предельный переход к состоянию в котором турбулентный поток тепла и поток импульса связаны без каких-либо эмпирических коэффициентов. Предполагается, что этому состоянию соответствует вырожденная функция распределения флуктуаций скорости звука. Предложен критерий характеризующий это состояние сильно устойчивой стратификации. На основе понятия потенциально доступной энергии турбулентности, связанной с адиабатическими флуктуациями давления, рассмотрен баланс флуктуаций силы градиента давления и силы плавучести.

Компенсация искажений волнового фронта широкоспектрального источника по опорному источнику

Башкатов Г.В., Животовский И.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

bashkatov@bmstu.ru

Ключевые слова: адаптивная оптика, атмосферная турбулентность, опорная длина волны

С ростом диаметра апертуры астрономических телескопов возникает необходимость коррекции атмосферных искажений, вызванных неоднородностью распределения показателя преломления по трассе. Современные системы коррекции используют датчик Шака-Гартмана в качестве корректора волнового фронта, работающий по монохроматическому источнику, а объектом коррекции является излучение от полихроматического источника (звезда, планета и т.д.). Оказалось, что коррекция на отличной от опорной длине волны не позволяет эффективно исправить атмосферные искажения во всем диапазоне длин волн.

Модель адаптивного зеркала и распространения излучения в атмосфере.

Для анализа эффективности коррекции был смоделирован сегментированный tip-tilt корректор, состоящий из 19 сегментов.

Излучения моделировалось при помощи плоской волны, а атмосфера при помощи последовательного распространения

- 1) в вакууме методом углового спектра на расстояние $L/2$,
 - 2) через фазовый экран, полученный с использованием модифицированного спектра фон Кармана [1,2,3],
 - 3) в вакууме методом углового спектра на расстояние $L/2$, где L – длина трассы.
- Результаты.

Эффективная коррекция наблюдается в диапазоне $\lambda = \lambda_{\text{опор}} + [-100 \div 300]$ нм.

Литература:

1. Lukin V. P., Fortes B. V. Adaptive beaming and imaging in the turbulent atmosphere. – SPIE Press, 2002. – Т. 109.
2. Kliment J.I.T. Optimising Transmittance Measurements of Lasers Propagating Through Localised Optical Turbulence By Varying Focal Geometry. – The University of Manchester (United Kingdom), 2020.
3. Latychevskaja T., Fink H. W. Practical algorithms for simulation and reconstruction of digital in-line holograms //Applied optics. – 2015. – Т. 54. – №. 9. – С. 2424-2434.

Прогноз горных волн на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения

Вербицкая Е.М., Романский С.О.

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Владивосток, Россия*

89144287691@yandex.ru

Ключевые слова: горная волна, данные наблюдений, авиационная безопасность, технология прогноза

Представлены результаты исследований по созданию технологии прогноза наличия и интенсивности горных волн (ГВ) на территории Дальнего Востока и Восточной Сибири. Актуальность работы обусловлена полным отсутствием методов прогнозирования наличия и интенсивности ГВ на территории РФ вообще и на рассматриваемой территории, в частности. Анализ физической карты ДВ-региона показывают, что на данной территории ГВ в том или ином месте могут формироваться ежедневно и прогнозирование их наличия, местоположения и интенсивности, опасной для аэронавигации, весьма актуальная задача. Разработка методов и технологий прогноза ГВ над указанной территорией выполнена на данных модели WRF-ARW [1] с горизонтальным шагом 5 км в рамках темы 1.4.2.2 Плана НИТР Росгидромета на 2020 – 2024 гг.

Основной сложностью решения поставленной задачи является практически полное отсутствие данных наблюдений и инструментальных измерений характеристик ГВ. Горную волну невозможно увидеть визуально, за исключением случаев, когда она порождает специфическую облачность чечевицеобразной формы. Но и в этом случае фиксация явления в сводках погоды не предусмотрена.

В докладе представлены методы идентификации процесса формирования ГВ на базе модельной орографии и метеорологических прогнозов, в т. ч. определения ареалов возможного возникновения ГВ, метеорологических условий возникновения ГВ в этих ареалах. Предложены подходы к оценке параметров ГВ, обсуждается возможность практического применения результатов при обслуживании авиационных полетов.

Литература:

1. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Определение типа и формы рельефа в методологии прогноза горных волн по негидростатической модели численного прогноза погоды высокого пространственного разрешения // Марчуковские науч. чт.–2022: Тезисы Междунар. конф. 3–7 октября 2022 г. – Новосибирск, 2022. – С. 74.
2. Power J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C. The weather research and forecasting model: overview, system efforts, and future directions. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2017. – Vol. 98, P. 1717–1737.

Проникновение акустико-гравитационных волн через критические уровни в верхние слои атмосферы

Гаврилов Н.М.¹, Кшевецкий С.П.², Коваль А.В.¹, Курдяева Ю.А.³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

³Северо-западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и радиоволн РАН,
Калининград, Россия
n.gavrilov@spbu.ru

Ключевые слова: акустико-гравитационные волны, численное моделирование, критический уровень, вторичные волны

С помощью численной модели высокого разрешения [1] изучается распространение акустико-гравитационных волн (АГВ) в верхнюю атмосферу. Профиль фонового ветра содержит критические уровни (КУ), на которых горизонтальная скорость ветра равна горизонтальной фазовой скорости первичной АГВ. По теории атмосферных АГВ, вблизи КУ вертикальная длина волны стремится к нулю и АГВ, распространяющиеся из тропосферы, должны сильно диссипировать и не могут достигать более высоких слоев атмосферы.

В настоящем численном моделировании первичная АГВ задается в виде плоских волновых возмущений вертикальной скорости, распространяющихся вдоль поверхности Земли. При активации источника волн возникает начальный импульс АГВ [2]. В течение нескольких минут он распространяется на высоту 100 км и выше, рассеиваясь под воздействием высокой вязкости и теплопроводности. Затем на всех атмосферных высотах устанавливается интервал для установления волнового процесса, который может длиться до нескольких десятков периодов от источника первичной волны.

Струйные течения в атмосфере аппроксимируются гауссовыми профилями среднего зонального ветра и имеют максимумы на высоте 110 км и в страто-мезосфере на высоте 50 км. Расчеты показывают, что в сценарии высотного струйного течения вблизи КУ происходит резкое уменьшение вертикальной длины волны и сильная диссипация АГВ волны из-за высокой молекулярной и турбулентной вязкости. Поэтому, над высотным струйным течением амплитуда АГВ значительно меньше, чем при его отсутствии.

В случае струйного течения в средней атмосфере, часть волновой энергии может проходить через КУ и распространяться дальше в верхнюю атмосферу. В областях КУ может происходить повышенная генерация вторичных волновых мод [3,4]. Поэтому, основные вторичные волновые моды с горизонтальной длиной, равной половине и одной трети длины волны первичной АГВ, могут доминировать на высотах, превышающих 120 км, где амплитуды этих вторичных мод могут превышать амплитуды АГВ в отсутствие КУ.

Литература:

1. AtmoSym, 2017. URL: <http://atmos.kantiana.ru/language/ru> (accessed June 10, 2024).
2. Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P., Koval A.V., 2015. Geosci. Model Develop. 8. 1831–1838. DOI: 10.5194/gmd-8-1831-2015.
3. Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P., 2023. Solar-Terr. Phys. 9(3), 86–92. DOI: 10.12737/stp-93202310.
4. Vadas, S. L., Becker, E., Bossert, K., et al. 2024. J. Geophys. Res. Space Phys. 129(9). e2024JA032521. DOI: 10.1029/2024JA032521.

Тропосферно-стратосферное взаимодействие в годы Эль-Ниньо и Ла-Нинья: исследование с использованием модели Земной системы ИВМ РАН

Гвоздева А.В.^{1,2}, Володин Е.М.², Гущина Д.Ю.^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

gvozdevaav@my.msu.ru

Ключевые слова: тропосферно-стратосферное взаимодействие, поток волновой активности
Пламба, Эль-Ниньо, Ла-Нинья, INM-CM

В ходе предыдущих исследований было установлено, что события Эль-Ниньо оказывают значительное влияние не только на внетропическую тропосферную циркуляцию, но и на циркуляцию стратосферы [1]. Тропосферный механизм передачи сигнала из тропиков в умеренные широты реализуется благодаря горизонтальному распространению длинной волны Россби из тропиков в средние и высокие широты, вызывая аномалии давления в основных центрах действия атмосферы.

В свою очередь, влияние на стратосферу при Эль-Ниньо происходит через усиление климатической стационарной волны за счёт углубления ложбины в районе Алеутского минимума. Этот процесс в годы Эль-Ниньо сопровождается интенсификацией распространения волновой энергии в стратосферу, увеличивая вероятность ослабления циркумполярного стратосферного вихря путём замедления западного потока, а также повышения температуры воздуха.

В рамках данного исследования был проведён анализ изменений в тропосфере и стратосфере полярных и умеренных широт Северного и Южного полушарий во время событий Эль-Ниньо (с разделением на два типа) и Ла-Нинья с использованием трёхмерного потока волновой активности Пламба [2]. Анализ проводился на основе численных экспериментов российской модели Земной системы ИВМ РАН — INM-CM5-0, а также её модифицированных версий INM-CM6-L и INM-CM6-M.

Качество моделей оценивалось путём сравнения с данными реанализа ERA5. Результаты показали, что модели неточно воспроизводят усиление или ослабление потока волновой активности во время явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, что приводит к некорректному представлению планетарных волн и ошибкам в усилении или ослаблении потока тепла в стратосферу.

Исследование проводилось в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (Соглашение № 169-15-2023-003).

Литература:

1. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMIP5 и реанализа / Коленикова М.А., Варгин П.Н., Гущина Д.Ю. // Метеорология и гидрология. – 2021. – №6. – С. 5-23.
2. Plumb R.A. On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves / R. A. Plumb // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1985. – Vol. 42, № 3. – P. 217–229.

Нейронно-сетевой алгоритм восстановления метеопараметров из профилей индекса рефракции

Горбунов М.Е.^{1,2}

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

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

gorbunov@ifaran.ru

Ключевые слова: радиозатменное зондирование, восстановление термодинамических переменных, уравнение гидростатики, искусственная нейронная сеть

Термодинамические переменные, включающие температуру, давление и влажность являются важными прогностическими параметрами. Радиозатменное зондирование атмосферы Земли (РЗЗА) на частотах глобальных навигационных спутниковых систем (1.2–1.6 ГГц) чувствительно к атмосферному показателю преломления, зависящему от трех термодинамических переменных. Для сухой атмосферы восстановленный профиль индекса рефракции, дополненный уравнением гидростатики, позволяет восстановить две термодинамические переменные: температуру и давление [1]. Высота, на которой вклад влажности становится малым, меняется от 8 км в полярных областях до 12 км в тропиках. На этих высотах среднеквадратичная ошибка восстановления температур в предположении сухой атмосферы составляет около 0.5 К, а ошибка удельной влажности около 0.1 г/кг. В нижней тропосфере максимальная ошибка восстановления температуры меняется от 15 К в полярных областях до 40 К в тропиках [2]. Профиль индекса рефракции и уравнение гидростатики недостаточны для восстановления трех термодинамических переменных.

В данной работе мы обсудим метод восстановления термодинамических переменных из индекса рефракции, основанный только на уравнении гидростатики и дополнительных эмпирических ограничениях.

В данной работе мы предлагаем подход, основанный на ИНС и уравнении гидростатики. ИНС вычисляет правую часть уравнения гидростатики. Для этого достаточно вычислять температуру из давления, индекса рефракции. Удельная влажность в свою очередь является известной функцией от давления, температуры и индекса рефракции; плотность является известной функцией от термодинамических переменных. Это позволяет интегрировать уравнение гидростатики, в котором давление является динамической переменной. Статистический анализ показывает, что удельная влажности восстанавливается с точностью в пределах 1 г/кг, и эта величина убывает с высотой.

Работа выполнена при поддержке госзадания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (тема 17.1).

Литература:

1. Ware, R., C. Rocken, F. Solheim, M. Exner, W. Schreiner, R. Anthes, D. Feng, et al. GPS Sounding of the Atmosphere from Low Earth Orbit: Preliminary Results. Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996, 77 (1): 19–40. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0019:GSOTAF>2.0.CO;2.
2. М.Е. Горбунов. Усвоение данных радиозатменных наблюдений в численном прогнозе погоды. Метеорология и гидрология. 2024, № 7, с. 122–134. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-7-122-134

Анализ вариаций волновой активности и волновых процессов во время сложных ВСП

Диденко К.А.^{1,2}, Бикбулатов Б.А.¹, Ермакова Т.С.^{2,3}, Коваль А.В.^{2,3}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
(ИЗМИРАН), Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия
didenko.xeniya@yandex.ru

Ключевые слова: стратосферный полярный вихрь, планетарные волны, внезапное стратосферное потепление, энтропия, волновая активность

Изучена эволюция различных нелинейных процессов в средней атмосфере, связанных с распространением стационарных планетарных волн (СПВ) во время развития сложных внезапных стратосферных потеплений (ВСП). СПВ, определяющиеся фиксированной относительно Земли поверхностью постоянной фазы, распространяются с групповыми скоростями, обеспечивая перенос энергии и импульса из тропосферы. Воздействие волн, приходящих снизу из плотной тропосферы и характеризующихся сильной нелинейностью, вызывает аномалии стратосферной циркуляции. Взаимодействуя со средним потоком, волны влияют на структуру стратосферного полярного вихря. Наиболее ярко эффекты взаимодействий СПВ со средним потоком, а также взаимодействий между СПВ проявляются во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) – сильных термодинамических явлений в зимней полярной стратосфере. ВСП влияют на всю среднюю атмосферу и вызывают значительные изменения в тропосфере и термосфере. Один из способов исследования внутренней динамики развития ВСП, связанной с волновыми процессами – это изучение изменчивости возмущенной потенциальной энтропии (квадрат потенциальной завихренности). Используя данные реанализа MERRA-2 были проанализированы изменчивости волновой активности, дивергенции и адвекции потока возмущенной потенциальной энтропии, взаимодействий волн со средним потоком и между собой. Анализ был проведен для зим 2003-2004 и 2005-2006 годов, когда наблюдались ВСП со сложной термодинамической структурой. Их структура характеризовалась сложными пространственно-временными распределениями зонального ветра, температуры, а также амплитуд планетарных волн с различными зональными волновыми числами на разных этапах развития ВСП. Показаны сходства в развитии нелинейных взаимодействий между планетарными волнами и различия во взаимодействии планетарных волн со средним потоком при формировании ВСП. Полученные оценки волновых процессов могут быть использованы в качестве предикторов формирования внезапных стратосферных потеплений.

Измерения времени распространения волны Лэмба при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай и сравнение с расчетом по данным прогнозной модели атмосферы Global Forecast System

Закиров М.Н.¹, Митасов Ю.А.², Попов О.Е.¹, Куличков С.Н.¹, Чунчузов И.П.¹

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

²*Академия РВСН им. Петра Великого, Москва, Россия*

zakirov1998@list.ru

Ключевые слова: волна Лэмба, инфразвук, вулкан Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай

В результате извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. на всех станциях международной системы инфразвукового мониторинга была зарегистрирована волна Лэмба (ВЛ). Обработка сигналов ВЛ проводилась в частотном диапазоне 0.00015-0.00065 Гц. Высокий уровень сигнала ВЛ позволил точно измерить времена распространения ВЛ. Для оценки времени излучения ВЛ использовалась запись барографа в 64 км от вулкана. Измеренное по данным этого барографа время излучения ВЛ 04:32:04 15.01.2022 UTC. Время распространения ВЛ зависит от профилей температуры и ветра. Расчеты времени распространения ВЛ проводились по данным прогнозной модели атмосферы Global Forecast System [1]. Вдоль дуг большого круга, по которым распространялась ВЛ, рассчитывалось поле эффективной скорости звука до высот 79 км и затем время распространения ВЛ по формулам из [2]. Рассчитанное время распространения первого прихода ВЛ на станцию IS43 (Дубна) 15182 км 50240 с близко к измеренному времени распространения ВЛ 49977 с. При этом не учитывалось временное изменение параметров атмосферы за время распространения ВЛ. Можно отметить большой диапазон изменения скорости ВЛ при распространении до IS43: от скорости 322 м/с в экваториальной части Тихого океана до скорости 279 м/с при прохождении высоких широт. Это можно объяснить тем, что ВЛ распространяется вдоль земной поверхности и наибольшее влияние на скорость ее распространения оказывают приземные свойства атмосферы. Поскольку ВЛ несколько раз огибает Землю, то длина ее волнового фронта по мере распространения, то увеличивается до максимального размера равного окружности Земли, то уменьшается до минимальных размеров в антиподальной точке и в точке источника. Рассчитанные времена распространения ВЛ позволяют прогнозировать искажение волнового фронта волны, вызванное азимутальным отличием свойств атмосферы. Измеренные времена распространения ВЛ могут дать интегральную оценку отличия данных прогнозной модели от истинных.

Литература:

1. Global Forecast System (GFS) | National Centers for Environmental Information (NCEI) URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>
2. Allan D. Pierce, Joe W. Posey, Theory of the Excitation and Propagation of Lamb's Atmospheric Edge Mode from Nuclear Explosions, Geophysical Journal International, Volume 26, Issue 1-4, December 1971, Pages 341–368

Нейросетевой метод классификации инфразвуковых сигналов

Закиров М.Н.¹, Митасов Ю.А.², Куличков С.Н.¹, Чуличков А.И.³, Цыбульская Н.Д.¹

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

²Академия РВСН им. Петра Великого, Москва, Россия

³Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Москва, Россия

zakirov1998@list.ru

Ключевые слова: классификация, инфразвук, сверточная нейронная сеть

К настоящему времени уже создана и находится в непрерывной эксплуатации международная система мониторинга инфразвуковых волн (IMS) [1], на которой уже зарегистрировано несколько десятков миллионов инфразвуковых событий. Одной из проблем, возникающих при анализе регистрируемых инфразвуковых сигналов, является идентификация их источников. Дело в том, что на больших расстояниях крайне сложно при визуальном анализе различить сигналы от импульсных и непрерывных источников.

Предложен нейросетевой метод для классификации инфразвуковых сигналов, записанных в г. Фэрбанкс, Аляска и в Антарктике. Архив включает в себя 404 записи продолжительностью 160 минут каждая, среди которых имеются записи сигналов извержений вулкана, полярных сияний, микробаромов, горных обвалов и взрывов. Поскольку инфразвук способен распространяться на большие расстояния, умение анализировать его может быть очень полезно для отслеживания различных событий и явлений на нашей планете. Первая попытка классифицировать такие сигналы предпринята в работе [1] и основана на теории проверки статистических гипотез, важный результат этой работы - разработка метода, хорошо классифицирующего сигналы на два типа: сигналы, связанные с вулканической активностью и взрывами, и все остальные. В настоящей работе количество классов увеличено до пяти, с использованием сверточной нейронной сети. Представлены качественные схемы, иллюстрирующие принцип работы и количественные графики, показывающие точность распознавания алгоритма. Результаты исследования можно объяснить тем, что сигналы от северных сияний, микробаромов и горных обвалов, в отличие от взрывов, могут быть малой амплитуды, и их очень тяжело отличить от фона. Предложенный метод может быть улучшен с появлением новых данных и использован для классификации реальных сигналов.

Литература:

1. Julie Marty. The IMS Infrasound Network: Current Status and Technological // Chapter 1 in the book: Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, Eds A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne, 2019, Springer, pp. 3-62.

2. Tsybul'skaya, N.D., Kulichkov, S.N. & Chulichkov, A.I. Studying possibilities for the classification of infrasonic signals from different sources. Izv. Atmos. Ocean. Phys. 48, 384–390 (2012).

<https://doi.org/10.1134/S0001433812040147>

Отклик верхней атмосферы на внетропические циклоны

Захаров В.И.^{1,2,3}, Шалимов С.Л.^{3,4}, Акперов М.Г.²

¹Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

⁴Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

zvi_555@list.ru

Ключевые слова: сверх длинноволновое радиопросвечивание, атмосферные внутренние гравитационные волны, внетропические циклоны, ионосфера

В работе проведено комплексное исследование воздействия внетропических циклонов на верхнюю атмосферу.

Для исследования возмущения нижней атмосферы использовались данные сверхдлинноволнового зондирования в диапазоне 3–30 кГц, полученные на уникальной научной установке [1]. Найдены практически синхронные с ними возмущения ионосферы, выделенные на данных спутников системы ESA Swarm [2].

Характеристики циклонов во внетропических широтах ($\approx 20^\circ$ Северного полушария) определялись по данным реанализа ERA5 для атмосферного давления на уровне моря при использовании метода идентификации характеристик циклонов [3].

На основе использованных данных по методикам [4] исследован отклик нижней и верхней ионосферы в ночное время на прохождение 48 внетропических циклонов в Дальневосточном регионе России в период 2014–2023 гг. В 12 случаях обнаружено, что возмущения в нижней ионосфере, отмечаемые по вариациям амплитуды и фазы СДВ-сигнала, а также сопряженные с ними вариации электронной плотности в верхней ионосфере во время активной стадии циклонов соответствуют прохождению атмосферных внутренних гравитационных волн и их диссипации. Приводится ряд примеров.

Результаты для внетропических циклонов, в ряде существенных черт сходные со случаями тропических циклонов [5], интерпретированы как результат воздействия на различные высоты атмосферы внутренних атмосферных волн, порождаемых циклоном ВНЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ГЕНЕЗИСА. Иначе говоря, ВГВ, генерируемые циклоном и при благоприятных условиях достигающие ионосферы, способны вызывать как вариации фазы и амплитуды СДВ-сигнала в нижней атмосфере, так и вариации плотности плазмы в верхней ионосфере, причем структура откликов показывает возможность взаимодействия внутренних волн от разных источников.

Литература:

1. <http://www.gsras.ru/unu>
2. <http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/Swarm>
3. Акперов М.Г., Бардин М.Ю., и др. // Изв. РАН. Физ. Атмосф. и океана, 2007. Т. 43. № 6. С. 764–772. DOI: 10.31857/S0002351523040028
4. Шалимов С.Л., В.И. Захаров и др. // Геомаг. и Аэронав., 2023. Т. 63. №1. С. 216–226. DOI: 10.31857/S001679 4022600 442.
5. Захаров В. И., Филипенко В. А., и др. // Солнечно-земная физика, 2019. Т. 5. № 2. С.114–123. DOI: 10.12737/szf-52201914

Обзор зависимости амплитуд атмосферных приливов от фаз естественных тропических осцилляций: численное моделирование

Коваль А.В.^{1,2}, Диденко К.А.^{1,3}, Ермакова Т.С.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

(ИЗМИРАН), Троицк, Россия

a.v.koval@spbu.ru

Ключевые слова: циркуляция атмосферы, тропические колебания, атмосферные приливы, динамика атмосферы

Работа посвящена изучению зависимости амплитуд атмосферных приливов от фаз долгопериодных осцилляций в тропиках: квазидвухлетнего колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере (КДК) и Эль-Ниньо Южного колебания (ЭНЮК). С этой целью были проведены численные расчеты глобальной циркуляции атмосферы с использованием нелинейной механистической модели атмосферы МСВА по ряду сценариев, учитывающих различные комбинации КДК/ЭНЮК. Рассчитаны структуры мигрирующих суточного и полусуточного приливов с зональными волновыми числами, соответственно, 1 и 2, а также немигрирующие суточный и полусуточный приливы с зональными числами, соответственно, 2 и 1. Исследование проведено для бореальной зимы (январь - февраль) – сезона максимальной волновой активности планетарных волн, вовлеченных в процесс нелинейной генерации немигрирующих приливов. Показано, в частности, что мигрирующий суточный прилив усиливается при западной фазе КДК и при Ла-Нинья. Для полусуточного мигрирующего прилива эффект от ЭНЮК сильнее, чем от КДК: при фазе Эль-Ниньо наблюдается уменьшение амплитуды прилива в экваториальной области и ее увеличение к югу и к северу от этой области, не зависимо от фазы КДК. При Ла-Нинья эффект в целом противоположный. Изменения немигрирующих приливов отличается от мигрирующих с теми же периодами, что обуславливается изменением волновой активности стационарной планетарной волны с зональным числом 1: нелинейное взаимодействие первичных мигрирующих приливов с этой волной генерирует немигрирующие приливы. Проведенное нами численное моделирование в «идеализированных» условиях, подразумевающее изолирование воздействия КДК и ЭНЮК, позволило разделить влияние обеих осцилляций, что невозможно сделать при обработке данных наблюдений в связи ограниченным временным рядом и, следовательно, недостаточным объемом выборки для необходимой статистики для разделения этих близких по периоду феноменов. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-77-10006-П).

Слоистая структура средней атмосферы по данным акустического зондирования

Куличков С.Н.¹, Митасов Ю.А.², Чунчузов И.П.¹, Кшевецкий С.П.³, Закиров М.Н.¹, Попов О.Е.¹,
Перепелкин В.Г.

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

²Академия РВСН им. Петра Великого, Москва, Россия

³Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

snik1953@gmail.com

Ключевые слова: анизотропные структуры, акустическое зондирование, средняя атмосфера

Представлены результаты исследования тонкой структуры (анизотропной турбулентности) средней атмосферы (20-120 км) акустическим методом. Исследование проведено по двум направлениям-теоретическом и экспериментальном. На первом этапе, на основе разработанной модели, показана возможность формирования тонкой слоистой структуры средней атмосферы внутренними гравитационными волнами от метеорологических фронтов. Представлены вертикальные и горизонтальные спектры анизотропных структур. Далее, на основе обработки данных наблюдений инфразвуковых волн от взрывов и извержений вулканов получены вертикальные профили тонко-слоистых неоднородностей в средней атмосфере. Использовалось два метода обработки экспериментальных данных:

1. Явление соответствия спектров неоднородностей и спектров регистрируемых инфразвуковых волн, отраженных от этих неоднородностей.
2. Предложен новый метод обработки инфразвуковых сигналов, основанный на способе их разложения на отдельные импульсы методом распознавания образов. Впервые, установлено, что тонкая структура средней атмосферы может быть стабильной на значимых интервалах времени во всей толще средней атмосферы.

Эффект мажорных внезапных стратосферных потеплений во внутрисезонных вариациях действующей высоты слоя Е-спорадического ионосферы

Куминов А.А.

Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия
airship@mail.mipt.ru

Ключевые слова: слой Е-спорадический, стратосферная циркуляция, межсезонная изменчивость, внутрисезонные вариации, внезапные стратосферные потепления, волны Россби, радиозондирование ионосферы

Наряду с резко выделяющимися годовыми и суточными вариациями действующей высоты слоя Е-спорадического ионосферы ($h'E_S$) существует широкий спектр вариаций $h'E_S$ с промежуточными частотами, обладающий тем свойством, что летом амплитуды этих вариаций заметно меньше, чем зимой [1]. Если вспомнить о том, что согласно [2] в летние сезоны восточная циркуляция в стратосфере препятствует вертикальному распространению волн Россби из нижней атмосферы, а зимняя западная циркуляция снимает эту блокировку, то можно попытаться объяснить сезонные различия в амплитудах вариаций $h'E_S$ эффектом их обусловленности сезонными различиями в амплитудах проникающих в нижнюю термосферу волн Россби.

Природа сама подсказывает метод проверки этого предположения. Как известно, зимние мажорные внезапные стратосферные потепления (ВСП) характеризуются не только дополнительным нагревом стратосферы, но и реверсом стратосферной циркуляции с западной на восточную. Если высказанное выше предположение о влиянии межсезонной фильтрации волн Россби на амплитуду вариаций $h'E_S$ является верным, то во время мажорных ВСП размах вариаций $h'E_S$ должен заметно уменьшиться.

С использованием метода наложения эпох для отрезков временных рядов $h'E_S$ по архивным данным ионосферной станции Poitiers (46°6 с.ш., 0°3 в.д.), связанных по времени с известными мажорными ВСП [3], выявлено резкое уменьшение амплитуды внутризимних вариаций $h'E_S$ во время мажорных ВСП и тем самым подтверждена возможность объяснения межсезонных различий в амплитудах вариаций $h'E_S$ влиянием фильтрации волн Россби.

Попутно открывается возможность диагностики мажорных ВСП на основе оперативных данных станций вертикального радиозондирования ионосферы по $h'E_S$.

Литература:

1. Куминов А.А. О связи характеристик годового хода действующей высоты слоя Е-спорадического ионосферы с сезонными перестройками стратомезосферной циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Том 58. № 4. С. 480–490.
2. Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // Journal of Geophysical Research. 1961. V. 66. № 1. P. 83–109.
3. <https://csl.noaa.gov/groups/csl8/sswcompendium/index.php>.

Численное моделирование возмущений в нейтральной атмосфере, создаваемых землетрясениями

Курдяева Ю.А.¹, Кшевещкий С.П.^{2,3}

¹Калининградский филиал Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

yakurdyeva@gmail.com

Ключевые слова: землетрясение, атмосфера, атмосферные волны, численное моделирование

Моделирование эффектов, вызванных землетрясениями, в верхней атмосфере является актуальной и важной как геофизической, так и вычислительной задачей. Основным источником таких возмущений во время землетрясений являются акустические (АВ) и внутренние гравитационные волны (ВГВ), генерируемые преимущественно в тропосфере. Для качественного моделирования 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 землетрясениями. Обсуждаются особенности задания источника возмущений, ассоциированного с такими процессами. Проведена серия расчетов для двух землетрясений: японское 11 марта 2011 года (Тохоку) и турецко-сирийское землетрясение 6 февраля 2023 года. Рассмотрены особенности реакции атмосферы в зависимости от масштабов расчетной области и количества узлов расчетной сетки. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными данными изменения ионосферных параметров. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения понимания физических процессов в верхней атмосфере и ионосфере во время землетрясений.

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

Волны в тяжелом стратифицированном газе: Расщепление на подзадачи акустических и гравитационных волн

Кшевецкий С.П.^{1,2,3}, Курдяева Ю.А.⁴, Гаврилов Н.М.³

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

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

⁴Калининградский филиал Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

renger@mail.ru

Ключевые слова: уравнения гидродинамики, длинные волны, асимптотические решения, операторное уравнение, акустические волны, внутренние гравитационные волны, дисперсионное соотношение

Рассматриваются двумерные линеаризованные гидродинамические уравнения, описывающие распространение волн в стратифицированном тяжелом газе. Система гидродинамических уравнений переформулирована как одно операторное уравнение типа

Шредингера. Рассматриваются волны, у которых $\beta = \frac{l_z}{l_x} \ll 1$, где l_z и l_x –

характерные вертикальный и горизонтальный масштабы, соответственно, и изучается асимптотика решений $\beta \rightarrow 0$. Показано, что множество решений по зависимости от β образуют два непересекающихся класса. Для решений из каждого из выделенных классов предложена своя, асимптотическая при $\beta \rightarrow 0$, приближенная система уравнений. Выделенные классы решений – это акустические и внутренние гравитационные волны. Показано, что у акустических и гравитационных волн гидродинамические переменные связаны некоторыми стационарными соотношениями, различными для каждого класса. Это позволяет поставить задачу о выделении вкладов акустических и гравитационных волн в начальном условии. Показано существование решения этой задачи разделения волн. Приведены примеры решения задачи о разделении общей задачи на подзадачи о распространении акустических и гравитационных волн.

Получены оценки разделения энергии начального возмущения по типам волн.

Внутренние гравитационные волны вблизи мезопаузы по наблюдениям ночных эмиссий гидроксила

Попов А.А.¹, Гаврилов Н.М.¹, Перминов В.И.², Перцев Н.Н.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

andrew.popovix@gmail.com

Ключевые слова: верхняя атмосфера, ночные свечения, гидроксил, интенсивность, вращательная температура, климатология, сезонные вариации, мезомасштабная изменчивость, внутренние гравитационные волны

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию внутренних гравитационных волн (ВГВ) в средней и верхней атмосфере. 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, полученные с помощью спектрографа СП-50 с цифровой записью спектра в области 800 - 1000 нм [1]. Для выделения мезомасштабных вариаций характеристик ночных свечений применен метод разностной цифровой частотной фильтрации [2]. В качестве исходных данных берутся регистрации характеристик ночного свечения f_1 в моменты времени t_i , которые усредняются прибором за время накопления. Функция $f(t)$ может быть представлена в виде разложения в ряд Фурье по гармоникам $F_{cb}(w+\psi)$ с различными амплитудами F , частотами w и фазами ψ . Приборное усреднение по интервалам δt приводит к уменьшению регистрируемых амплитуд Фурье-гармоник до значений $r_1 = \sin(\beta)/\beta$ и $\beta = \omega \delta t/2$. Для оценки месячных стандартных отклонений δf мезомасштабных вариаций используется численная фильтрация путем определения разностей между регистрируемыми значениями f_1 , 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 [3] позволяют получить формулы для связи амплитуд волновых вариаций горизонтальной скорости U и потенциальной волновой энергии E_p с мезомасштабной дисперсией и средним значением температуры. Исследованы сезонные и междугодовые 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.

Литература:

1. Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю. Излучение верхней атмосферы– индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
2. 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 Tory and Zvenigorod JASTP. 2020. V. 205. P. 105311. doi : 10.1016/j.jastp.2020.105311.
3. Gossard E.E., Hooke W.H. Waves in the atmosphere. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam-Oxford-New York, 1975.

О возможных источниках геомагнитных вариаций, приуроченных к сильным землетрясениям

Рябова С.А.^{1,2}, Шалимов С.Л.²

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

riabovasa@mail.ru

Ключевые слова: землетрясение, геомагнитное поле, вариации, медленные магнитогидродинамические (МГД) волны, межпланетное магнитное поле, перемещающиеся ионосферные возмущения

В настоящей работе исследована интенсификация вариаций геомагнитного поля, приуроченная к сильным удаленным землетрясениям. В качестве исходных привлекались данные регистрации магнитной индукции на земной поверхности, выполненной на обсерваториях международной сети ИНТЕРМАГNET и на среднеширотной Геофизической обсерватории "Михнево" Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН. В ходе исследований установлено, что спектральные пики геомагнитных вариаций в диапазоне 5–13 мин (диапазон магнитных пульсаций Pc5–Pc6) могут быть обусловлены соответствующими вариациями компонент межпланетного магнитного поля. Геомагнитные вариации с периодами больше 13 мин интерпретированы как результат распространения медленных магнитогидродинамических (МГД) волн, возбужденных в ионосфере акустическим импульсом после землетрясений, или как результат прохождения перемещающихся ионосферных возмущений. Исследование выполнено в рамках государственного задания ИДГ РАН № 122032900185-5 "Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях" и в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Климатическая модель зависимости индекса атмосферной рефракции от высоты, широты, долготы и дня года по данным радиозатменного зондирования

Шмаков А.В.¹, Горбунов М.Е.^{1,2}

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

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

ldr@ifaran.ru

Ключевые слова: радиозатменное зондирование, индекс рефракции, климатическая модель

За последние годы метод радиозатменного зондирования атмосферы Земли с помощью навигационных спутников стал приобретать все большее значение для климатических и метеорологических наблюдений. Данный метод обладает целым рядом преимуществ, включая всепогодную работу, глобальное покрытие земной атмосферы, высокое вертикальное разрешение, долговременную стабильность и самокалибровку. С его помощью сначала восстанавливают профиль угла атмосферной рефракции, а затем параметры нейтральной атмосферы на высотах 2-35 км. Выше 45 км шумы (ионосферный, тепловой шум приемника и т.д.) начинают превосходить полезный сигнал в радиозатменных данных. Для подавления шума используется метод статистической регуляризации, который позволяет построить наиболее вероятный профиль угла рефракции на основе измеренного и априорного. В качестве априорного часто используют профиль из климатической модели. В настоящей работе мы улучшили ранее разработанную нами методику и построили климатическую модель нейтрального индекса атмосферной рефракции на основе данных спутниковых радиозатменных наблюдений, полученных в эксперименте COSMIC/FORMOSAT (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate /Formosa Satellite Mission) за период с 2007 года по 2016 год. Сравнение модельных и исходных профилей индекса рефракции показало точность и достоверность построенной модели.

Работа выполнена при поддержке госзадания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (FMWR-2022-0016)

Содержание

Секция I. Турбулентность в атмосфере и океане

<u>Баранов Н.А.</u> , Динамика вихревого следа за самолетом в условиях температурной стратификации	7
<u>Беркон Г.А.</u> , Поливанов П.А., Маркин В.В. Методика калибровки оборудования БВС, используемого для измерения параметров атмосферной турбулентности.....	8
<u>Бутаков Н.Ю.</u> , Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю. Предварительные результаты гидрометеорологического прогноза для Северного морского пути с использованием системы атмосфера-океан-лёд	9
Вербицкая Е.М., <u>Вербицкая З.В.</u> , Котельникова М.С., Романский С.О. Анализ самолетных наблюдений атмосферной турбулентности над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока	10
<u>Вульфсон А.Н.</u> , Николаев П.В. Локальное подобие и распространение полуэмпирической теории Прандтля на описание турбулентных моментов конвективного пограничного слоя атмосферы.....	11
<u>Голицын Г.С.</u> О точности описания статистики природных явлений уравнениями Колмогорова (1934) для случайных движений.....	12
<u>Горчаков Г.И.</u> , Чхетиани О.Г., Карпов А.В., Гушин Р.А., Даценко О.И. Турбулентные потоки аэрозоля и тепла при всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля	14
<u>Гушин Р.А.</u> , Горчаков Г.И., Карпов А.В., Даценко О.И. Электрические процессы в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях.....	15
<u>Даценко О.И.</u> , Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гушин Р.А. Оптические и микрофизические характеристики пылевого аэрозоля на ближнем востоке весной 2022 г.....	16
<u>Ермаков А.Д.</u> , Фортова С.В. Моделирование столбовых вихревых структур в замкнутой кубической области.....	17
<u>Иванова А.Р.</u> , Шакина Н.П., Комасько Н.И., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А., Соколова У.О. Скорость вихревой диссипации как мера интенсивности турбулентности и возможности ее оперативного прогнозирования для метеобеспечения авиации	18
<u>Карпов А.В.</u> , Горчаков Г.И., Гушин Р.А. Вариации турбулентных потоков пылевого аэрозоля на опустыненной территории	19
<u>Козлов В.С.</u> , Карпов А.В., Горчаков Г.И., Гушин Р.А., Даценко О.И. Особенности взаимосвязи сезонной и суточной динамики массовой концентрации чёрного углерода (сажи) в приземном субмикронном аэрозоле г. Москвы в 2023 г.....	20

<u>Копров Б.М., Копров В.М., Чхетиани О.Г., Шишов Е.А.</u> Быстрые повороты ветра в приземном слое	21
<u>Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В.</u> Конвективные структуры вблизи нагретой поверхности	22
<u>Мамонтов А.Е., Федорова О.В., Горбунов М.Е.</u> Пространственные распределения аэрозоля в тропосфере по данным проекта DELICAT	23
<u>Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.</u> Определение областей атмосферной турбулентности с заданными характеристиками	24
<u>Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В.</u> Доказательство гипотезы Хопфа о структуре турбулентности	25
<u>Посудневская А.О., Фортова С.В., Долуденко А.Н., Гузев М.А., Колоколов И.В., Лебедев В.В.</u> Методы анализа вихревых течений колмогоровского типа в квадратной области	26
<u>Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Шишов Е.А., Азизян Г.В.</u> Относительная спиральность в условиях измерительных полигонов Калмыкии и Цимлянска	27
<u>Старченко А.В., Дель И.В., Сваровский А.И.</u> Численное моделирование турбулентности в атмосферном пограничном слое с использованием моментной алгебраической модели	28
<u>Степанов Д.В., Сачнева Н.В., Островский А.Г., Шестакова А.А.</u> Вертикальное перемешивание и обмен в условиях сильной мезомасштабной динамики и экстремального атмосферного воздействия	29
<u>Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н.</u> Структура потоков тепла и влаги в зональных равнинных ландшафтах России в условиях глобального потепления	30
<u>Ушаков К.В., Ибраев Р.А.</u> Численное моделирование вихревого меридионального переноса тепла в Мировом океане	31
<u>Фортова С.В., Гузев М.А., Посудневская А.О., Долуденко А.Н., Ермаков А.Д.</u> Методы анализа двумерных и квазидвумерных турбулентных течений колмогоровского типа	32
<u>Чефранов С.Г., Чефранов А.С.</u> Exact unsteady solution to the n-dimensional compressible Navier-Stokes equations	33
<u>Чунчузов И.П., Попов О.Е., Чхетиани О.Г., Куличков С.Н., Белан Б.Д., Фофонов А.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В.</u> Спектральные характеристики мезомасштабной турбулентности в устойчиво-стратифицированной атмосфере, полученные по данным самолетных измерений и инфразвукового зондирования атмосферы ...	34
<u>Чухарев А.М., Павленко О.И., Коржуев В.А.</u> Нестационарный турбулентный обмен в верхнем пограничном слое моря и когерентные структуры	35

<u>Шелехов А.П.</u> Численное моделирование парения квадрокоптера в турбулентной атмосфере	36
<u>Шиховцев А.Ю.</u> , Ковадло П.Г. Особенности параметризаций турбулентных характеристик: данные оптических и микрометеорологических измерений	37
<u>Шишов Е.А.</u> , Зайцева Д.В., Люлюкин В.С. Разработка системы для многоточечных измерений в приземном слое атмосферы.....	38
<u>Юшков В.П.</u> Интегралы сохранения и случайные источники в теории турбулентности.....	39
<u>Юшков В.П.</u> Колмогоровские спектры как ряды случайных процессов.....	40
<u>Юшков В.П.</u> , Курбатов Г.А. Адиабатические флуктуации давления в турбулентном потоке	41
 <i>Секция II. Геофизическая гидродинамика</i>	
Арутюнян Д.А., <u>Жмур В.В.</u> Режимы поведения квазигеострофического эллипсоидального вихря в горизонтальном потоке с вертикальным сдвигом	42
<u>Блинов Д.В.</u> , Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Бундель А.Ю., Смирнов А.В. Улучшенное усвоение данных и сверхкраткосрочный численный прогноз погоды в системе COSMO-Ru2By	43
<u>Гавриков А.В.</u> , Кошкина В.С. Климатология мезомасштабных когерентных структур Северной Атлантики	44
Жиленко Д.Ю., <u>Кривоносова О.Э.</u> Переход к турбулентности при периодической модуляции скорости вращения.....	45
<u>Ингель Л.Х.</u> К теории склоновых течений.....	46
Калашник М.В., <u>Чхетиани О.Г.</u> Устойчивость верхних тропосферных течений и режим хаотических колебаний	47
<u>Кочин А.В.</u> Особенности внутримассовой плавучести	48
<u>Кривоносова О.Э.</u> , Жиленко Д.Ю. Предвестники неустойчивости и положение предела устойчивости в присутствии шума	49
<u>Курганский М.В.</u> , Ярынич Ю.И. Двухпараметрическая модель интенсивных атмосферных вихрей.....	50
<u>Павел Берлов</u> , Майкл Хэйг, Евгений Рыжов, Луолин Сан, Игорь Каменкович, Джеймс Мак Вильямс Турбулентный перенос синоптическими вихрями: полно-тензорный подход	51
<u>Чашечкин Ю.Д.</u> Динамика, структура, энергетика и микроэнергетика периодических течений в атмосфере.....	52

Чхетиани О.Г., Гледзер Е.И., Калашник М.В. Транзиентные моды в геофизической гидродинамике	53
---	-----------

Юсупов Ю.И. Исследование активной конвекции с использованием расчетов потенциального вихря и спиральности	54
--	-----------

Секция III. Общая циркуляция атмосферы, динамика и предсказуемость атмосферных и климатических процессов

Акперов М.Г., Гиппиус Ф.Н., Мохов И.И. Связь морского волнения с циклонической активностью в атмосфере Северного полушария по данным реанализа ERA5	55
--	-----------

Алдони́на Т.А., Семенов В.А., Li F., Keenlyside N.S., Wang L. Региональные особенности изменения арктического морского льда в первой половине XX века по данным новой реконструкции и других наборов данных	56
--	-----------

Алексеев Г.В., Лукьянова Р.Ю., Глок Н.И. О роли Солнца в формировании аномалий климата	57
---	-----------

Алешина М.А., Семенов В.А., Воронцова В.А., Акперов М.Г., Чернокульский А.В., Шве́ц Н.В. Изменения характеристик летних осадков разного временного разрешения в Сочи в последние десятилетия	58
---	-----------

Алипова К.А., Мизяк В.Г., Толстых М.А., Гойман Г.С. Развитие системы ансамблевого среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ.....	59
---	-----------

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Зоркальцева О.С., Гочаков А.В., Артамонов М.Ф. Событийный анализ аномалий циркуляционного режима в феврале 2024: процессы тропосферно-стратосферного взаимодействия и результаты самолетного зондирования	60
---	-----------

Аржанов М.М., Мохов И.И., Парфенова М.Р. Изменения площади снежного покрова в Евразии в XXI веке по модельным расчетам и данным наблюдений.....	61
--	-----------

Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Розинкина И.А.Ривин Г.С., Алферов Д.Ю., Алферов Ю.В., Копейкин В.В., Волкова В.А. Развитие методов краткосрочного ансамблевого прогнозирования в Гидрометцентре России	62
--	-----------

Баданов А.Ю., Юсупов Ю.И. Наукастинг глубокой влажной конвекции с использованием спутниковых данных.....	63
---	-----------

Безверхний В.А. О корреляции внутривековых колебаний длительности суток, сильной сейсмической активности и Эль-ниньо	64
---	-----------

Безотечская Е.А. Исследование структуры и циркуляции зонального участка летнего струйного течения над акваторией Северной Атлантики и Великобритании.....	65
--	-----------

<u>Белова И.Н., Гинзбург А.С., Докукин С.А., Фалалеева В.А.</u> Учет биоклиматических факторов при оценке потребности теплоснабжения городов юга Западной Сибири	66
<u>Бугримов А.В., Чернокульский А.В., Давлетшин С.Г., Спрыгин А.А., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И.</u> Градовые события в России: климатология и анализ условий формирования	67
<u>Вазасва Н.В., Чхетиани О.Г., Голицын Г.С.</u> Об универсальных статистических закономерностях шквальных ветров.....	68
<u>Варгин П.Н., Коваль А.В., Гурьянов В.В., Володин Е.М., Розанов Е.В.</u> Особенности динамики нижней стратосферы Арктики в конце зимнего сезона по данным реанализа и моделирования.....	69
<u>Вильфанд Р.М., Куликова И.А., Хан В.М., Макарова М.Е.</u> Долгопериодная изменчивость и предсказуемость волн тепла и холода	70
<u>Волков И.О., Розинкина И.А., Копейкин В.В.</u> Алгоритм учета продолжительности залегания снега в кронах деревьев для выявления «эффективной» границы снежного покрова для численного прогнозирования погоды (на основе COSMO-Ru).....	71
<u>Володин Е.М., Грицун А.С., Брагина В.В., Черненко А.Ю., Тарасевич М.А.</u> Модель климата ИВМ РАН. Современное состояние, перспективы развития, вероятное участие в следующей фазе международного сравнения климатических моделей....	72
<u>Гвоздева А.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В., Володин Е.М.</u> Прогнозируемые изменения главных мод долгопериодной климатической изменчивости в XXI веке моделью Земной системы ИВМ РАН	73
<u>Гостев К.С., Вазасва Н.В., Чернокульский А.В.</u> Анализ воспроизведения Ивановской вспышки смерчей по результатам расчетов с моделью WRF-ARW в сравнении с данными наблюдений.....	74
<u>Губенко И.М.</u> Учет процессов электризации при обзёрнении в задаче прогноза грозовой активности для территории Подмосковья	75
<u>Данилович И.С., Акперов М.Г.</u> Современные тенденции циклогенеза и осадков в Атлантико-Европейском секторе	76
<u>Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.</u> Количественные оценки роли естественных и антропогенных стоков и источников CO₂ и CH₄ в балансе регионов северного полушария.....	77
<u>Железнова И.В., Гущина Д.Ю.</u> Воспроизведение глобальной и региональной атмосферной циркуляции в модели INM-CM6M и оценка изменения циркуляции в будущем климате.....	78

<u>Зюляева Ю.А., Собаева Д.</u> ЭНЮК и изменчивость стратосферного полярного вихря, как факторы формирования предсказуемости погоды на внутрисезонном временном масштабе в Атлантико-Европейском секторе	79
<u>Ильющенкова И.А., Коржииков А.Я., Иванов Б.В.</u> Повторяемость индексов атмосферной циркуляции при формировании аномальных летних сезонов на арх. Шпицберген	80
<u>Карандашева Т.К., Иванов Б.В., Ревина А.Ф., Ильющенкова И.К.</u> Пространственно-временные особенности современного потепления в Баренцевом и Карском морях	81
<u>Кошель А.А., Червяков М.Ю.</u> Мониторинг событий Эль-Ниньо (Ла-Нинья) по данным спутниковых наблюдений температурного и радиационного режима в экваториальной части Тихого океана	82
<u>Крупчатников В.Н., Гочаков А.В., Боровко И.В., Градов В., Володин Е.М.</u> О планетарном потоке энергии и производстве энтропии в области струйного течения и земной поверхностью	83
<u>Латонин М.М.</u> Резкое изменение зимнего климата Арктики в 2005 году в Восточном полушарии, связанное с радиационными процессами в атмосфере	84
<u>Леонова Д.С., Акперов М.Г.</u> Оценка ветроэнергетического потенциала российской Арктики на основе данных наблюдений и модельных расчетов	85
<u>Ломакин И.Р., Кислов А.В.</u> Экстремальные скорости ветра в Атлантическом секторе Арктики: статистика и циркуляционные модели	86
<u>Медведев А.И., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю.</u> Усовершенствование расчета испарения с поверхности суши в модели деятельного слоя суши TerM (ИВМ РАН — МГУ)	87
<u>Медведева И.В., Ратовский К.Г.</u> Исследование межгодовых вариаций температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации над Восточной Сибирью	88
<u>Михайлов Р.П., Гурьянов В.В., Елисеев А.В.</u> Анализ частоты молний в четырёх моделях СМIP6	89
<u>Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Денисов С.Н., Тимажев А.В., Климович Г.П.</u> Фазовые соотношения между изменениями глобальной температуры и содержания CO₂ в атмосфере при комбинированном воздействии на Земную систему	90
<u>Мухин Д.Н., Самойлов Р.С.</u> Эмпирическая реконструкция режимов погоды средних широт как метастабильных состояний атмосферы	91
<u>Мысленков С.А., Круглова Е.Е.</u> Штормовое волнение и повторяемость циклонов в восточном секторе российской Арктики	92

<u>Нарижная А.И.</u> , Чернокульский А.В., Мохов И.И., Тимажев А.В., Семенов В.А. Характеристики облачности в Арктике по данным глобальных климатических моделей и спутниковых наблюдений при разной концентрации морского льда	93
<u>Нерушев А.Ф.</u> , Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Статистические модели и прогнозы временной изменчивости характеристик поля ветра и содержания парниковых газов по данным дистанционных измерений	94
<u>Никитин М.А.</u> , Ревокатова А.Ю., Ломакин И.Р. Анализ влияния изменения границы морского льда на полярные циклоны по данным модели ICON	95
<u>Парфенова М.Р.</u> , Елисеев А.В., Мохов И.И. Байесовы оценки площади распространения морского льда в Арктике в 21 веке по данным моделей CMIP6 и спутниковых наблюдений	96
<u>Переведенцев Ю.П.</u> , Мирсаева Н.А., Гурьянов В.В., Николаев А.А. Современные тенденции изменения основных климатических показателей на территории России	97
<u>Пискунова Д.А.</u> , Чубарова Н.Е., Шатунова М.В., Шувалова Ю.О. Роль нисходящей длинноволновой радиации в прогнозе температуры воздуха в условиях снежного покрова	98
<u>Плюсков А.Н.</u> , Елисеев А.В., Мохов И.И. Представление неопределенности палеорекострукции климата в последнем ледовом цикле в виде окрашенного шума при моделировании динамики ледовых щитов Северного полушария	99
<u>Радионов А.А.</u> Об адиабатических источниках/стоках тепла, действующих при формировании внезапных стратосферных потеплений в столбе сжимаемой атмосферы.....	100
<u>Ривин Г.С.</u> , Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Блинов Д.В., Копейкин В.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Чубарова Н.Е., Шатунова М.В., Алферов Ю.В., Коспанов А.А., Никитин М.А., Полухов А.А., Ревокатова А.П., Шувалова Ю.О. Система краткосрочного численного прогноза погоды Гидрометцентра России на основе российских глобальной и региональных конфигураций бесшовной негидростатической модели нового поколения ICON.....	101
<u>Розинкина И.А.</u> , Ривин Г.С., Блинов Д.В., Астахова Е.Д., Татаринovich Е.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Хлестова Ю.О., Никитин А.Е., Гоморев И.А., Волков И.О. Резервы повышения качества системы краткосрочного численного прогноза COSMO-Ru и эффективности интерпретации продукции высокого разрешения.....	102
<u>Романенко В.А.</u> , Семенов В.А. Пространственно-временная эволюция арктического морского льда в 21 веке согласно данным наблюдений и моделей CMIP6	103
<u>Рубчєна А.В.</u> , Попова В.Г., Иванов Б.В. Турбулентный поток тепла северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 г.г.....	104

<u>Сафонов С.Е., Гаврилов А.С., Мухин Д.Н.</u> Применение рекуррентных нейронных сетей для анализа динамики атмосферных режимов средних широт.....	105
<u>Селезнев А.Ф., Гаврилов А.С., Мухин Д.Н., Лоскутов Е.М., Фейгин А.М.</u> Эмпирическое моделирование динамики колебания Эль-ниньо: структурная устойчивость и бифуркации стохастических моделей.....	106
<u>Серых И.В., Толстиков А.В.</u> Изменения климата западной части российской Арктики в 1940-2099 годы по наблюдениям, реанализам и моделям СМIP6.....	107
<u>Собаева Д., Зюляева Ю.А.</u> Влияние локализации аномалий ТПО в тропическом Тихом океане на крупномасштабную структуру планетарных волн и тропосферно-стратосферную динамику в идеализированных модельных экспериментах	108
<u>Солдатенко С.А.</u> Облик и структура нейросетевой модели для изучения и прогнозирования состояния земной климатической системы	109
<u>Спрыгин А.А., Калмыкова О.В.</u> Диагностические признаки интенсивной конвекции, проявляющиеся в данных дистанционных наблюдений	110
<u>Степанов Р.А., Фрик П.Г., Соколов Д.Д.</u> Согласованность климатических изменений в разных временных масштабах в отдаленных районах северной Атлантики.....	111
<u>Сухановский А.Н., Гаврилов А.А., Васильев А.Ю., Попова Е.Н.</u> Механизм арктического усиления в лабораторном аналоге общей циркуляции атмосферы	112
<u>Тарасевич М.А., Володин Е.М.</u> Инициализация сезонных ретроспективных прогнозов климатической модели INMCM5 с использованием техники притягивания	113
<u>Тетельмин В.В.</u> Алгоритм прогноза частоты опасных природных стихийных бедствий.....	114
<u>Тимажев А.В., Мохов И.И.</u> Повторяемость атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультideсятилетней осцилляций.....	115
<u>Тихоненко Н.Д., Докукин С.А., Гинзбург А.С.</u> Демонстрационная электротепловая модель климатической системы	116
<u>Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Зарипов Р.Б., Гойман Г.С., Мизяк В.Г., Алипова К.А., Рогутов В.С., Бирючева Е.О.</u> Воспроизведение атмосферной циркуляции новой версией глобальной модели атмосферы ПЛАВ.....	117
<u>Фадеев Р.Ю., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зеленко А.А., Беляев К.П., Кулешов А.А., Толстых М.А.</u> Предсказуемость атмосферной циркуляции совместной моделью SLNE: первые оценки	118

<u>Фрик П.Г.</u> , Сухановский А.Н., Степанов Р.А., Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Глобальная циркуляция и бароклинные волны средних широт в случае зонально однородных граничных условий	119
<u>Черненко А.Ю.</u> , Володин Е.М. Оценка поглощения углерода из атмосферы наземными экосистемами с помощью Модели Земной системы ИВМ РАН	120
<u>Чернокульский А.В.</u> , Козлов Ф.А., Алешина М.А., Семенов В.А., Швець Н.В. Оценка связи интенсивности осадков с температурой и влажностью воздуха по данным плювиографических наблюдений с высоким временным разрешением	121
<u>Шерстюков Б.Г.</u> , Шерстюков А.Б. О связи современных многолетних колебаний температуры воды в мировом океане с особенностями повторяющихся изменений в динамике солнечной системы	122
<u>Шершакова А.О.</u> Применение машинного обучения для создания адаптивных алгоритмов распознавания угроз конвективных опасных явлений	123
<u>Шихов А.Н.</u> , Чернокульский А.В., Ярынич Ю.И. Долгоживущие сильные шквалы в лесной зоне России	124
<u>Шихов А.Н.</u> , Чернокульский А.В., Ярынич Ю.И. Оценка связей пространственно-временного распределения ветровалов в лесной зоне России с конвективными параметрами атмосферы и молниевой активностью	125
Шишов А.Е., <u>Горлач И.А.</u> Распознавание облачности глубокой конвекции по дистанционным данным геостационарных МИСЗ с помощью методов машинного зрения	126

Секция IV. Состав атмосферы и перенос примесей

<u>Александров Г.Г.</u> , Виноградова А.А., Гинзбург А.С., Губанова Д.П. Статистическое моделирование влияния метеоусловий на концентрацию приземного аэрозоля в мегаполисе в зимнее время	127
Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., <u>Белан Б.Д.</u> , Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Особенности состава воздуха над Российским сектором Арктики и прилегающими территориями	128
<u>Артамонов А.Ю.</u> Измерения концентраций CO₂ в акватории ЮБК летом 2024г ...	129
<u>Артамонова М.С.</u> , Чхетиани О.Г., Лапченко В.А., Иорданский М.А., Максименков Л.О. Временные вариации элементного и дисперсного состава атмосферного фоновго аэрозоля в Крыму весной-летом 2020 года	130
<u>Артамонова М.С.</u> , Чхетиани О.Г., Лапченко В.А., Иорданский М.А., Максименков Л.О. Экспериментальные исследования аэрозоля в Крыму в 2018-2024 гг.	131

Артамонова М.С., <u>Сеник И.А.</u> , Чхетиани О.Г., Обвинцев Ю.И., Максименков Л.О. Мониторинг аэрозоля на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА в 2010-2020 гг.	132
Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Коханенко Г.П., <u>Насонов С.В.</u> , Новоселов М.М., Пеннер И.Э. Лидарные исследования особенностей суточной динамики вертикальной структуры атмосферного аэрозоля в летний период над прибрежной территорией озера Байкал	133
Балугин Н.В., <u>Юшков В.А.</u> , Фомин Б.А., Суханов А.Я., Маричев В.Н., Бочковский Д.А. Возможности исследования аэрозольного состава атмосферы с помощью аэрозольного зонда обратного рассеяния	134
<u>Березина Е.В.</u> , Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В., Артамонов А.Ю., Беликов И.Б., Белоусов В.А. Влияние температурной стратификации нижнего километрового слоя воздуха над Москвой на приземное содержание загрязняющих примесей по измерениям на станции ИФА им. Обухова РАН в 2020–2023 гг.	135
<u>Борисов Д.В.</u> , Кузнецова И.Н. Интеграция химической транспортной модели и искусственной нейронной сети для повышения качества прогноза воздушных концентраций O_3 и PM_{10}	136
<u>Боровский А.Н.</u> , Постыляков О.В. Вертикальное распределение NO_2 в нижней тропосфере на Звенигородской научной станции: первые результаты измерений методом MAX-DOAS	137
<u>Васильева А.В.</u> , Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Беликов И.Б., Лаврова О.В., Панкратова Н.В. Возможности уточнения оценок эмиссий от лесных пожаров в Сибири по данным наземных наблюдений	138
<u>Виноградова А.А.</u> , Губанова Д.П., Иванова Ю.А. Аэрозольное загрязнение приземного воздуха вблизи Звенигорода и в Москве: когда пригород можно считать фоном.. 139	139
<u>Вишератин К.Н.</u> , Устинов В.П., Шилкин А.В. Результаты измерений концентраций CO_2, CH_4, N_2O в приземном слое на ст. Обнинск в 1998-2023 годах	140
<u>Гаврилов Г.О.</u> , Усачева А.А., Казанцев В.С., Ларина А.В., Тышова Е.А., Белов А.Е. Эмиссия метана из термокарстовых озер южной тундры Западной Сибири	141
<u>Губанова Д.П.</u> , Чхетиани О.Г., Кудерина Т.М., Иорданский М.А., Обвинцев Ю.И., Артамонова М.С., Максименков Л.О. Физико-химические характеристики аридного аэрозоля Прикаспия и Приаралья как удаленных источников атмосферной пыли в центральных и северных районах европейской России	142
<u>Гушина Д.Ю.</u> , Тарасова М.А., Горбаренко Е.М., Железнова И.В., Емельянова Е.Р., Гибадуллин Р.Р., Ольчев А.В. Различия в отклике потоков CO_2 на аномальные погодные условия в тропических, умеренных и полярных широтах	143
<u>Ермакова Т.С.</u> , Коваль А.В. Влияние естественных тропических осцилляций на содержание озона и меридиональную циркуляцию в зимней стратосфере	144

<u>Загайнова М.С.</u> Особенности загрязнения воздуха приземным озоном в Красноярске в 2023 году, обусловленное метеоусловиями и концентрациями других загрязняющих веществ.....	145
<u>Кириллова Н.С.</u> , Ракитин В.С., Джола А.В., Федорова Е.И., Еланский Н.Ф. Долговременные тренды общего содержания монооксида углерода в атмосфере Московского мегаполиса и их связь с метеорологическими условиями	146
<u>Кирсанов А.А.</u> , Чубарова Н.Е., Варенцов М.И., Ривин Г.С., Ольчев А.В. Учет аэрозольного эффекта в численных экспериментах с использованием системы COSMO-Ru-ART	147
<u>Коршунов В.А.</u> Характеристики стратосферного аэрозоля природных пожаров по данным лидарных измерений в г. Обнинск с 2012 по 2023 гг.	148
<u>Кривенко Л.А.</u> , Тананаев Н.И., Баишев Н.Е. Эмиссия метана и углекислого газа в местах выхода на поверхность подземных вод Центральной Якутии.....	149
<u>Куликов М.Ю.</u> , Беликович М.В., Чубаров А.Г., Дементьева С.О., Фейгин А.М. Химическое равновесие ночных ОН и NO ₂ на высотах мезосферы – нижней термосферы.....	150
<u>Ларина А.В.</u> , Гаврилов Г.О., Казанцев В.С., Кривенко Л.А. Суточная динамика и межгодовые различия эмиссии метана южнотундровыми полигональными торфяниками	151
<u>Локощенко М.А.</u> , Еланский Н.Ф., Богданович А.Ю., Алексеева Л.И. Грозы в Москве и их влияние на состав приземного воздуха	152
<u>Лукьянов А.Н.</u> , Варгин П.Н., Юшков В.А. Влияние вулкана Хунга Тонга – Хунга Хаапай на содержание озона в стратосферном вихре Антарктики и Арктики в 2023 г. и 2024 г.....	153
<u>Люлюкин В.С.</u> , Беликов И.Б., Белоусов В.А., Ракитин В.С. Сопоставление наблюдаемых приземных концентраций ЛОС в Московском регионе с данными прогноза транспортно-химической модели SILAM.....	154
<u>Матешева А.В.</u> , Макоско А.А. Исследование тенденций загрязнения атмосферы вследствие дальнего переноса в регионе Кавказские Минеральные Воды в 1980-2050 гг. в условиях изменяющегося климата	155
<u>Медведев Е.В.</u> , Парамонова Н.Н., Ивахов В.М. Сравнительный анализ данных измерений концентрации CO ₂ в атмосфере, выполненных МГИ и ГГО в пгт. Кацивели за период с 2020 по 2024 гг.....	156
<u>Ныров А.О.</u> , Елисеев А.В., Мохов И.И. Усовершенствованная версия модели серного цикла атмосферы для моделей Земной системы промежуточной сложности.....	157
<u>Панкратова Н.В.</u> , Скороход А.И., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Баранов Б.В., Васильева А.В.,	

Давыдов Д.К., Пестунов Д.А., Моисеенко К.Б. Концентрации метана и диоксида углерода в атмосфере Арктики по данным судовых и самолетных измерений.....	158
<u>Пашенцева Е.В., Мухартова Ю.В., Мортиков Е.В., Постыляков О.В. Химико-транспортная модель переноса NO_x в атмосферном пограничном слое: сравнение RANS и LES моделирования, использование для обработки спутниковой съемки шлейфов NO₂</u>	159
<u>Петров Н.А., Чубарова Н.Е. Оценка влияния парниковых газов и атмосферного аэрозоля на коротковолновую и длинноволновую радиацию для условий безоблачного неба</u>	160
<u>Петров Н.А., Чубарова Н.Е., Шатунова М.В., Шувалова Ю.О. Оценка облачно-радиационных эффектов с использованием модели ECRAD для Московского региона</u>	161
<u>Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Кириллова Н.С., Федорова Е.И. Исследования трендов состава атмосферы и их отклика на климатические изменения на основе орбитальной информации и модельных расчетов.....</u>	162
<u>Рябова С.А. Суточные вариации PM_{2.5} и температуры воздуха в летний период 2023 года и их связь, по данным ЦГМ ИДГ РАН</u>	163
<u>Рябова С.А., Копылова Г.Н. Временные вариации радона и метеопараметров по данным обсерватории Карымшина на Камчатке за 2014–2023 гг.....</u>	164
<u>Смышляев С.П., Яковлев А.Р., Ромашенко Д.Д., Усачева М.А., Иманова А.С. Численное моделирование изменения химического состава нижней и средней атмосферы в конце XX - начале XXI веков</u>	165
<u>Угольников О.С. Измерение высоты, размеров частиц и волновых свойств полярных мезосферных облаков на основе сетевых фотометрических и триангуляционных измерений.....</u>	166
<u>Устимов И.А., Чуличков А.И., Постыляков О.В. Об определении высоты нижней границы облачности с использованием нейросетей по стереосъемке с Земли</u>	167
<u>Федорова Е.И., Ракитин В.С., Кириллова Н.С., Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф. Оценка дрейфа качества орбитальных наблюдений и применение методов коррекции к долговременным рядам измерений общего содержания CH₄ и CO спектрометра AIRS.....</u>	168
<u>Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Новигатский А.Н. Черты геохимии эоловой пыли в приводном слое атмосферы над морями Евразийской Арктики</u>	169
<u>Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Васильева А.В., Кравчишина М.Д. Метан в Арктике поздней осенью 2023 года: наблюдения АМК-93 и численное моделирование</u>	170

Секция V. Физика пограничных слоев

<u>Абделаал М.Э.</u> , Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О., Кузнецов И.А., Дольников Г.Г., Захаров А.В. Об электрических и электромагнитных свойствах ветропесчаного потока в условиях умеренных ветров	171
Анисимов С.В., <u>Галиченко С.В.</u> , Прохорчук А.А., Климанова Е.В., Козьмина А.С., Афиногенов К.В. Оценка автокорреляционных функций вариаций атмосферного электрического поля	172
Анисимов С.В., Галиченко С.В., <u>Прохорчук А.А.</u> Численные оценки ЭДС конвективного генератора невозмущённой атмосферы над сушей средних широт	173
Анисимов С.В., Мареев Е.А., <u>Галиченко С.В.</u> , Прохорчук А.А., Климанова Е.В., Козьмина А.С., Афиногенов К.В., Гурьев А.В. Сравнение результатов мезомасштабного и вихреразрешающего моделирования с данными наблюдений в пограничном слое атмосферы	174
<u>Варенцов А.И.</u> , Мортиков Е.В., Степаненко В.М., Глазунов А.В. Моделирование переноса аэрозолей в пограничном слое при типичных конфигурациях городской застройки	175
<u>Варенцов М.И.</u> , Тельминов А.Е., Кобзев А.А., Дрозд И.Д., Пашкин А.Д., Гавриков А.В., Артамонов А.Ю., Репина И.А., Степаненко В.М., Джоу Л. Мониторинг турбулентного энергообмена городских ландшафтов с атмосферой в Северной Евразии: первые результаты	176
<u>Дебольский А.В.</u> , Мортиков, Е.В. Исследование взаимодействия параметризаций вертикального турбулентного перемешивания и конвекции в модели INMCM	177
<u>Дмитриев Э.М.</u> Математическая модель приземного турбулентного электродного эффекта с учётом поглощения аэроионов в слое ниже высоты шероховатости подстилающей поверхности	178
<u>Докукин С.А.</u> , Тихоненко Н.Д., Гинзбург А.С. Моделирование формирования городского острова тепла в московской агломерации с помощью мезомасштабных климатических моделей COSMO-CLM и WRF	179
<u>Дружинин О.А.</u> Моделирование процессов теплообмена в воздушном потоке, несущем капли над взволнованной водной поверхностью	180
<u>Зайцева Д.В.</u> , Люлюкин В.С., Шишов Е.А., Кузнецов Д.Д. Результаты комплексного полевого эксперимента по исследованию субмезомасштабных когерентных структур в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое над степной поверхностью	181
<u>Ильина Д.Ю.</u> , Малиновская Е.А. Исследование турбулентных структур при обтекании естественных эоловых форм рельефа	182

Калинин С.Д., <u>Козлов Н.О.</u> , Малиновская Е.А., Зайцева И.В. О влиянии территории подвижных песков Калмыкии на температурный режим в окрестности	183
<u>Ковадло П.Г.</u> , Шиховцев А.Ю. Микроструктура турбулентности в нижнем слое атмосферы	184
<u>Константинов П.И.</u> , Коспанов А.А., Долгих А.В., Тимажев А.В. Исследование термической структуры необитаемых городских ландшафтов в высоких широтах	185
<u>Ладохина Е.М.</u> , Рубинштейн К.Г. Влияние урбанизации на атмосферу Санкт-Петербурга: численные эксперименты с различными параметризациями городского полога	186
Малиновская Е.А., <u>Калинин С.Д.</u> , Зайцева И.В. Определение термоконвективных структур в потоке данных	187
<u>Малиновская Е.А.</u> , Максименко Л.О., Козлов Н.А., Калинин С.Д. Полевой эксперимент по установлению свойств песчано-воздушной среды с использованием звуковой фиксации	188
<u>Миллер Е.А.</u> , Лукьянов А.Н., Баранов Н.А. Классификация условий накопления и рассеяния ЗВ в пограничном слое атмосферы по данным измерений температурной стратификации и ветра	189
<u>Миронов В.Л.</u> , Миронов С.В. Вихревые модели плоских турбулентных течений, ограниченных стенками	190
<u>Пашкин А.Д.</u> , Мортиков Е.В., Репина И.А., Богомоллов В.Ю., Тельминов А.Е., Смирнов С.В. Сравнение совместных распределений измеренных пульсаций метеопараметров в городском каньоне с данными вихреразрешающего моделирования	191
<u>Перов В.Л.</u> , Никитин М.А., Татаринович Е.В. Параметризация пограничного и приземного слоев атмосферы при моделировании устойчивых ситуаций в Арктике, для моделей прогноза погоды COSMO-Ru и ICON-Ru	192
<u>Плаксина Ю.Ю.</u> , Родыгин В.И., Пуштаев А.В., Руденко Ю.К., Винниченко Н.А., Уваров А.В. Влияние плёнки естественных примесей на тепломассообмен вблизи границы раздела «вода-воздух»	193
<u>Плахина И.Н.</u> , Репина И.А., Махоткин А.Н. Пространственная и временная изменчивость компонент радиационного баланса у поверхности Земли по натурным данным и данным реанализа, оценка параметрических связей с атмосферными факторам	194
<u>Репина И.А.</u> , Мортиков Е.В., Дебольский А.В., Чечин Д.Г., Пашкин А.Д., Артамонов А.Ю., Варенцов А.И. Взаимодействие атмосферы с неоднородной поверхностью по данным измерений и вихреразрешающего моделирования	195

<u>Силин Н.И.</u> , <u>Мортиков Е.В.</u> , <u>Дебольский А.В.</u> , <u>Чечин Д.Г.</u> Вихреразрешающее моделирование морского пограничного слоя при холодном вторжении в эксперименте (COMBLE)	196
<u>Согачев А.Ф.</u> , <u>Репина И.А.</u> Оценка области воздействия на газообмен водоем-атмосфера в прибрежной зоне: на примере водного участка полигона “Карбон-Поволжье”	197
<u>Степаненко В.М.</u> , <u>Медведев А.И.</u> , <u>Богомолов В.Ю.</u> , <u>Шангареева С.К.</u> , <u>Рязанова А.А.</u> , <u>Файкин Г.М.</u> , <u>Рыжова И.М.</u> , <u>Суязова В.И.</u> , <u>Дебольский А.В.</u> , <u>Черненко А.Ю.</u> Математическая модель деятельного слоя суши TerM: численное исследование гидрологического и углеродного циклов суши в условиях изменения климата	198
<u>Суязова В.И.</u> , <u>Дебольский А.В.</u> , <u>Мортиков Е.В.</u> Мезомасштабное и вихреразрешающее моделирование процессов обмена над термически неоднородной поверхностью на примере полигона Мухрино	199
<u>Тарасова М.А.</u> , <u>Варенцов М.И.</u> , <u>Дебольский А.В.</u> , <u>Степаненко В.М.</u> Сравнение параметризаций городской поверхности различной степени сложности в модели COSMO на примере Московской агломерации	200
<u>Тельминов А.Е.</u> , <u>Варенцов М.И.</u> , <u>Кобзев А.А.</u> , <u>Капустин С.Н.</u> Региональная система мониторинга энергообмена городского ландшафта с атмосферой г. Томск	201
<u>Фролькис В.А.</u> , <u>Евсиков И.А.</u> Оценка антропогенного потока тепла в течение отопительного периода на основе строительных норм и правил в городах Российской Федерации с населением не менее четырехсот тысяч человек	202
<u>Чечин Д.Г.</u> , <u>Дрозд И.Д.</u> , <u>Кривенок Л.А.</u> , <u>Пашкин А.Д.</u> , <u>Репина И.А.</u> , <u>Токарева З.К.</u> , <u>Устинов Н.Б.</u> Эмиссии метана неоднородным ландшафтом арктической тундры: влияние уровня болотных вод и температуры почвы	203
<u>Юшков В.П.</u> Турбулентные флуктуации в АПС при устойчивой стратификации .	204

Секция VI. Распространение и взаимодействие волн в атмосфере

<u>Башкатов Г.В.</u> , <u>Животовский И.В.</u> Компенсация искажений волнового фронта широкоспектрального источника по опорному источнику	205
<u>Вербицкая Е.М.</u> , <u>Романский С.О.</u> Прогноз горных волн на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения	206
<u>Гаврилов Н.М.</u> , <u>Кшевецкий С.П.</u> , <u>Коваль А.В.</u> , <u>Курдяева Ю.А.</u> Проникновение акустико-гравитационных волн через критические уровни в верхние слои атмосферы	207

<u>Гвоздева А.В., Володин Е.М., Гущина Д.Ю.</u> Тропосферно-стратосферное взаимодействие в годы Эль-Ниньо и Ла-Нинья: исследование с использованием модели Земной системы ИВМ РАН	208
<u>Горбунов М.Е.</u> Нейронно-сетевой алгоритм восстановления метеопараметров из профилей индекса рефракции	209
<u>Диденко К.А., Бикбулатов Б.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В.</u> Анализ вариаций волновой активности и волновых процессов во время сложных ВСП.....	210
<u>Закиров М.Н., Митасов Ю.А., Попов О.Е., Куличков С.Н., Чунчузов И.П.</u> Измерения времени распространения волны Лэмба при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай и сравнение с расчетом по данным прогнозной модели атмосферы Global Forecast System.....	211
<u>Закиров М.Н., Митасов Ю.А., Куличков С.Н., Чуличков А.И., Цыбульская Н.Д.</u> Нейросетевой метод классификации инфразвуковых сигналов	212
<u>Захаров В.И., Шалимов С.Л., Акперов М.Г.</u> Отклик верхней атмосферы на внетропические циклоны.....	213
<u>Коваль А.В., Диденко К.А., Ермакова Т.С.</u> Обзор зависимости амплитуд атмосферных приливов от фаз естественных тропических осцилляций: численное моделирование.....	214
<u>Куличков С.Н., Митасов Ю.А., Чунчузов И.П., Кшевецкий С.П., Закиров М.Н., Попов О.Е., Перепелкин В.Г.</u> Слоистая структура средней атмосферы по данным акустического зондирования	215
<u>Куминов А.А.</u> Эффект мажорных внезапных стратосферных потеплений во внутрисезонных вариациях действующей высоты слоя Е-спорадического ионосферы.....	216
<u>Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П.</u> Численное моделирование возмущений в нейтральной атмосфере, создаваемых землетрясениями	217
<u>Кшевецкий С.П., Курдяева Ю.А., Гаврилов Н.М.</u> Волны в тяжелом стратифицированном газе: Расщепление на подзадачи акустических и гравитационных волн	218
<u>Попов А.А., Гаврилов Н.М., Перминов В.И., Перцев Н.Н.</u> Внутренние гравитационные волны вблизи мезопаузы по наблюдениям ночных эмиссий гидроксила	219
<u>Рябова С.А., Шалимов С.Л.</u> О возможных источниках геомагнитных вариаций, приуроченных к сильным землетрясениям.....	220
<u>Шамаков А.В., Горбунов М.Е.</u> Климатическая модель зависимости индекса атмосферной рефракции от высоты, широты, долготы и дня года по данным радиозатменного зондирования.....	221