

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Геофизическая обсерватория «Борок» –
филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

Институт прикладной физики РАН

Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

СОСТАВ АТМОСФЕРЫ АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

XXIII Всероссийская школа-конференция
молодых ученых

Борок
5–9 октября 2020 г.

Тезисы докладов

Ярославль

2020

УДК 621.3.01(063)

ББК 31.211я431

С66

С66 Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы : тезисы докладов XXIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль : Филигрань, 2020. – 124 с.

ISBN 978-5-6044384-1-1

Ответственный редактор:
д.ф.-м.н. *С.В. Анисимов*

В сборнике представлены тезисы докладов XXIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Для ученых, работающих в области химии и физики атмосферы, атмосферного электричества, моделирования климата и смежных областях, преподавателей и студентов ВУЗов.

Проведение конференции и издание сборника тезисов осуществлено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-20025), ИФЗ РАН и ГО «Борок» ИФЗ РАН.

ISBN 978-5-6044384-1-1

© ГО «Борок» ИФЗ РАН макет,
оформление, верстка, 2020

© Коллектив авторов, текст, 2020

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Анисимов С.В. – д.ф.-м.н., Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок (председатель);
2. Еланский Н.Ф. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м. н., Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва (сопредседатель);
3. Фейгин А.М. – д.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород (сопредседатель);
4. Мохов И.И. – академик, профессор, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва;
5. Мареев Е.А. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород;
6. Тихоцкий С.А. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва;
7. Катцов В.М. – д.ф.-м.н., Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург;
8. Жмур В.В. – член-корреспондент РАН, профессор, д.ф.-м.н., Московский физико-технический институт, Москва;
9. Соломина О.Н. – член-корреспондент РАН, д.г.н., Институт географии РАН, Москва;
10. Володин Е.М. – д.ф.-м.н., Институт вычислительной математики РАН, Москва;
11. Грицун А.С. – д.ф.-м.н., Институт вычислительной математики РАН, Москва;
12. Тимофеев Ю.М. – д.ф.-м.н., физический факультет СПбГУ, Санкт-Петербург;
13. Чубарова Н.Е. – д.г.н., географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва.

Конференция организована при финансовой поддержке
РФФИ (грант № 20-05-20025), ИФЗ РАН и ГО «Борок» ИФЗ РАН

ПРЕДИСЛОВИЕ

Двадцать третья всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (САТЭП-2020) организована Геофизической обсерваторией «Борок» – филиалом Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН при участии Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Института прикладной физики РАН. Школа-конференция проводится с 5 по 9 октября 2020 г. в поселке Борок Ярославской области.

Школа-конференция имеет целью развитие творческих научных связей поколений российских ученых, являясь органическим продолжением Всероссийских конференций молодых ученых «Атмосферный озон» (1995–1997 гг.), «Малые примеси в атмосфере» (1998–1999 гг.), «Малые примеси атмосферы и атмосферное электричество» (2000–2003 гг.), «Состав атмосферы и электрические процессы» (2004–2005 гг.), «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (2006–2018 гг.). Постоянное расширение тематики конференций обусловлено сложным характером атмосферных процессов, их взаимосвязью и взаимодействием. Объединение в рамках проведенных конференций направлений изучения газовых составляющих атмосферы, атмосферного аэрозоля и электричества атмосферы, моделирования климата и формирования глобальной электрической цепи стало стимулом дальнейшей координации научных исследований и способствовало получению новых научных результатов в динамично развивающихся областях современной физики атмосферы.

Программа САТЭП-2020 включает четыре секции:

1. Наблюдения малых газовых примесей и электрических полей в атмосфере. Анализ и интерпретация данных.
2. Моделирование климатической системы.
3. Диагностика и моделирование физико-химических процессов в атмосфере.
4. Генерация электрических полей в атмосфере. Глобальная электрическая цепь.

В рамках каждой из секций наряду с докладами молодых (до 35 лет) исследователей представлены лекции ведущих российских ученых о последних достижениях в различных областях физики атмосферы.

Конференция организована при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-20025), ИФЗ РАН и ГО «Борок» ИФЗ РАН.

С. В. Анисимов
Н. Ф. Еланский
А. М. Фейгин

**НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ.
АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ**

Содержание кислорода и метана в городском воздухе в зависимости от климатических и метеорологических условий

А. С. Гинзбург, А. А. Виноградова

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

В наше время в городах проживает большинство человечества, потребляется большинство производимой в мире энергии, образуется большая часть твердых и жидких отходов и выбрасывается в воздух основное количество газовых и аэрозольных загрязнений.

Одновременно с этим большой город в некотором смысле формирует свой собственный климат за счет застройки огромных территорий и выделения городским хозяйством большого количества тепла в атмосферный пограничный слой.

В результате всех этих и ряда других процессов состав атмосферного воздуха в городской агломерации существенно отличается от воздуха окружающих город территорий.

В докладе будут обсуждены основные причины аномального содержания кислорода во время волн жары и холода, а также содержания метана во время теплых зим начала XXI века в атмосфере московской агломерации по результатам данных наблюдений за концентрациями кислорода и метана, полученным ГПБУ «Мосэкомониторинг».

Изменения химического состава атмосферы на примере озона и двуокиси азота

А. Н. Груздев

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

Будет дан обзор изменений содержания озона и двуокиси азота (NO_2) в атмосфере на разных временных масштабах под действием фотохимических и динамических процессов с привлечением моделирования и результатов измерений. Рассматриваются суточный и годовой циклы примесей, квазидвухлетние вариации, изменения в 11-летнем цикле солнечной активности и в результате солнечных протонных событий, влияние на стратосферное содержание O_3 и NO_2 продуктов вулканических извержений, стратосферного полярного вихря, внезапных стратосферных потеплений. Приводятся оценки многолетних трендов O_3 и NO_2 .

Динамика радона в атмосферном приземном слое

Э. М. Дмитриев

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Наибольший вклад в ионизацию нижней атмосферы вносит объемная активность (ОА) изотопов радона Rn^{222} и Rn^{220} [1]. Образующийся в земных недрах радон по поровому пространству горных пород и почвы переносится к земной поверхности и далее поступает в атмосферу. Плотность его потока с земной поверхности зависит, помимо интенсивности источников, от влажности почвы и атмосферного давления [2]. Распределение радона в атмосфере, в свою очередь, определяется прежде всего характером атмосферной турбулентности [3]. При этом обратное воздействие турбулентности атмосферы на плотность потока радона пренебрежимо мало [4].

Долгоживущий (время жизни — 5.5 суток) изотоп Rn^{222} благодаря турбулентному перемешиванию распространяется по всему атмосферному пограничному слою (АПС), проникая и в свободную атмосферу [5]. ОА Rn^{222} в большей части АПС слабо зависит от высоты, претерпевая наиболее резкие изменения вблизи земной поверхности. Вариации высотных профилей ОА Rn^{222} , включая приземный слой, определяются изменениями в стратификации и турбулентном режиме АПС [6]. При этом вблизи земной поверхности динамика высотных профилей ОА Rn^{222} может быть восстановлена по результатам наземных радонометрических и аэрофизических наблюдений [7].

Короткоживущий (время жизни — 4.5 мин) изотоп Rn^{220} (торон) полностью распадается в приземном слое. Вследствие этого даже при малой плотности потока Rn^{220} с земной поверхности его вклад в ионизацию приземной атмосферы может быть сравним с вкладом Rn^{222} [1]. Динамика высотных профилей ОА Rn^{220} при заданной плотности потока Rn^{220} с земной поверхности может быть оценена по результатам аэрофизических наблюдений, позволяющих рассчитать вариации высотного профиля коэффициента турбулентной диффузии [8].

В настоящей работе дан обзор различных подходов к описанию динамики изотопов радона в приземном слое. Представлены основанные на использовании уравнения турбулентной диффузии модели формирования стационарного высотного распределения радона в АПС [3] и приземной атмосфере [9], а также модели, рассматривающие систему грунт-атмосфера [4, 10]. Особое внимание уделено описанию динамики приземного радона по данным наземных наблюдений на основе различных моделей АПС [1, 5, 11] и приземного слоя атмосферы [7, 8, 12].

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00233) и РНФ (№16-17-10209).

Литература

1. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A.* Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability // *Boundary-Layer Meteorol.* 2018. V. 167, P. 327–348. DOI: 10.1007/s10546-017-0328-0
2. *Яковлева В.С.* Моделирование влияния состояния атмосферы и литосферы на динамику плотности потока радона и торона с поверхности земли // *Известия ТПУ.* 2010. Т. 317. № 2. С. 162–166.
3. *Jacobi W., Andre K.* The Vertical Distribution of Radon 222, Radon 220 and Their Decay Products in the Atmosphere // *J. of Geophys. Res.*, 1963, V. 68, № 13, P. 3799–3814.
4. *Дмитриев Э.М.* Влияние переноса атмосферного радона на поток радона с земной поверхности // *Физика Земли.* 2018. № 5. С. 115–121. DOI: 10.1134/S0002333718050046
5. *Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В.* Транспорт радона и формирование электрического состояния атмосферного пограничного слоя // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2016. Т. 9, № 4. С. 7–14.
6. *Williams A.G., Williams, Zahorowski W., Chambers S.D., Griffiths A., Hacker J.M., Element A., Werczynski S.* The vertical distribution of radon in clear and cloudy daytime terrestrial boundary layers // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 68. P. 155–174. DOI: 10.1175/2010JAS3576.1
7. *Anisimov S.V., Dmitriev E.M., Aphinogenov K.V., Guriev A.V., Kozmina A.S.* Variability of radon distribution in the atmospheric surface layer over the land of middle latitudes // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019. V. 231, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012006
8. *Козьмина А.С., Дмитриев Э.М.* Суточная вариация объемной активности торона в приземной атмосфере // *Сборник тезисов докладов 23-й Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» / ГО «Борок» ИФЗ РАН – Ярославль: Филигрань.* 2020. С. 26.
9. *Iordanov D.* On the Stationary Vertical Distribution of a Weightless Radioactive Substance in the Surface Air Layer // *Arch. Met. Geoph. Biokl.* 1968. A.17. P.246–250.
10. *Паровик Р. И.* Нелокальная модель диффузии-адвекции радона в системе грунт-атмосфера // *Мат. моделирование.* 2010. Т. 22. № 9. С. 95–106.
11. *Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Макрушин А.П., Шихова Н.М.* Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // *Физика Земли.* 2017. № 1. С. 155–170. DOI: 10.7868/S0002333717010033
12. *Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Козьмина А.С.* Фоновая объемная активность радона и торона в почве и приземной атмосфере по наблюдениям сейсмической радоновой станции // *Сейсмические приборы.* 2019. Т. 55. № 4. С. 5–16. DOI: 10.21455/si2019.4-1

Целевая аппаратура для мониторинга грозовой активности из космоса

А. В. Карелин, В. А. Шувалов, А. А. Яковлев

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королёв

Исследование грозовой активности в атмосфере Земли имеет длительную предысторию и, несмотря на обширные теоретические изыскания и опытные наблюдения, природа этого явления продолжает представлять значительный интерес [1]. Это определяется недостатком измерений физических параметров внутриоблачных грозовых процессов [2]. Результаты дистанционных наблюдений с поверхности Земли (или воздушных платформ) дают только косвенные данные о вторичных явлениях, преимущественно в форме электромагнитного излучения.

Масштабность электрических явлений в атмосфере, высота грозовых фронтов, частота и длительность молниевых вспышек приводит к тому, что пространственные координаты и выбор направлений для наблюдений измерительной аппаратурой носит случайный характер, что существенно снижает эффективность научных исследований. Тем не менее, большинство промышленно развитых стран имеют практический интерес к изучению атмосферного электричества, поскольку отсутствие этой информации приводит к неполноценности прогнозирования гидрометеорологической и геофизической обстановки.

Развитие космической техники предлагает новые возможности в изучении грозовой активности. В настоящее время детекторы молний устанавливаются на различных космических аппаратах (КА) дистанционного зондирования Земли [например, 3]. Глобальность грозовой активности, взаимосвязь гидрометеорологических и геофизических процессов, короткое время вспышек и др. снижают информативность результатов наблюдений локальных областей атмосферы с борта низкоорбитальных КА. Требуется глобальная и целостная картина грозовой обстановки, а также динамика её развития. Поэтому в настоящее время уделяется значительное внимание разработке детекторов молний для КА, функционирующих на геостационарных орбитах.

Важнейшим фактором эффективности мониторинга электрической активности в атмосфере является разработка и создание целевой аппаратуры КА, т.е. бортовых быстродействующих высокодетальных детекторов молний для обзора всего освещённого диска Земли с геостационарной орбиты. Исследования грозовой активности с таких орбит активно развиваются в США, Европе, Китае, России, Японии. Основные требования к целевой аппаратуре: глобальность наблюдения, то есть картирование молниевых вспышек о всего освещённого диска Земли; регистрация интенсивности из-

лучения, спектра молниевых вспышек и динамика грозových фронтов; разрешение на поверхности Земли 5–10 км; быстроедействие детектора – менее $2 \cdot 10^{-3}$ с.

В 2020 году на геостационарной орбите находятся 4 КА оснащенные детекторами молний — три американских GOES-16 (75,2°W), GOES-17 (137,2°W), GOES-T (137°W) и один китайский FY-4A (105°E) [4]. Запуск первого российского КА, оснащенного детектором молний, на геостационарную орбиту «Электро-М» № 1 в точку стояния 14,5°W планируется в 2025 году [4].

В настоящей работе представлен обзор и анализ характеристик детекторов молний как целевой аппаратуры геостационарных КА для решения задач мониторинга грозовой активности, оценка технологических возможностей, состояния и качества разработок целевой аппаратуры в России и за рубежом.

Литература

1. VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству [с международным участием]: сборник трудов / отв. ред. Г.Г. Щукин. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – 213 с.
2. Писанко Ю.В., Пугачев В.П., Шувалов В.А., Яковлев А.А. Дистанционные измерения локальных электрических полей в атмосфере земли космическими средствами // «Космонавтика и ракетостроение», № 3 (88), 2016, с. 141–148.
3. Гуревич А.В., Зеленый Л.М., Климов С.И. Научные задачи миссии «Чибис-М». // Миссия «Чибис-М». Сборник трудов выездного семинара, сер. «Механика, управление и информатика» / Под ред. Р.Р. Назирова. М., ИКИ РАН, 2009, с. 7–25.
4. Observing system capability analysis and review tools (OSCAR). Gap analysis: Measurement timeline for mission Lightning imagery from GEO or LEO// URL ресурс: <http://www.wmo-sat.info/oscar/gapanalyses?mission=17> (дата обращения 10.03.2020 г.).

О разрушении атмосферного озона в O_x , NO_x , NO_x , ClO_x , BrO_x и IO_x каталитических циклах

И. К. Ларин^{1,2}

¹ ИЭПХФ РАН им. В.Л.Тальрозе, Москва

² ФИЦ ХФ РАН им. Н.Н.Семенова, Москва

Представлены данные об относительном вкладе каталитических циклов O_x , NO_x , NO_x , ClO_x , BrO_x и IO_x в разрушение атмосферного озона для условий июня и январе 2000-го года на широте 50° с.ш. в диапазоне высот 0–50 км. Расчеты высотных профилей компонент указанных выше семейств производились с помощью интерактивной двумерной модели SOCRATES, а также с помощью одномерной фотохимической модели, разработанной в Институте энергетических проблем химической физики РАН им. В.Л.Тальрозе. В качестве начальных данных для расчетов использовались прогнозы атмосферного содержания парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата RCP 4.5 для 2000-го года. Расчеты скорости гибели озона проводились с помощью предложенного ранее автором алгоритма для определения скорости лимитирующей стадии каталитического цикла [1].

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, грант № 19-05-00080.

Литература

1. *Ларин И.К.* Химическая физика озонового слоя. М.: РАН. 2018. С.211.

Датчик концентрации легких атмосферных ионов

К. В. Афиногенов, С. В. Галиченко, А. В. Гурьев, С. В. Анисимов

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Электрические процессы в атмосфере Земли в настоящее время активно исследуются в связи с новыми возможностями, предоставляемыми разработкой новых точных приборов для натуральных наблюдений и средств их интеграции вместе с развитием вычислительных ресурсов и методов численного моделирования динамики геофизических полей [1, 2].

Разработан датчик концентрации легких атмосферных ионов обеих полярностей, позволяющий по результатам натуральных наблюдений ионных концентраций определять полярные электрические проводимости воздуха. Датчик предназначен как для длительной автономной работы в полевых условиях совместно с автоматизированной системой сбора данных, так и для долгосрочной работы в информационно-измерительном обсерваторском комплексе. Прибор выполнен в едином корпусе, защищенном от воздействия окружающей среды по классу IP54. Электропитание прибора и передача данных осуществляется по кабельной линии, которая подключается к разъему на корпусе. Напряжение питания прибора от 15 В до 18 В, потребляемая мощность не более 6 Вт. Выходной интерфейс UART с уровнями напряжений ТТЛ (5 В) и скоростью 9600 бит/с. Масса прибора 1 кг. Прибор гарантировано сохраняет работоспособность при температурах воздуха от -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности до 100%, допуская образование конденсата на поверхностях корпуса прибора. Прибор позволяет синхронно измерять концентрацию отрицательных и положительных легких атмосферных ионов в диапазоне 10^5 - 10^{10} $[\text{м}^{-3}]$ с разрешением по времени от 16 до 1 измерения в секунду. Пороговая подвижность регистрируемых легких аэроионов от $6 \cdot 10^{-5}$ $[\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}]$ до $6 \cdot 10^{-4}$ $[\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}]$ задается в программном обеспечении прибора с шагом 10^{-5} $[\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}]$, что позволяет получить функцию распределения концентраций легких аэроионов по подвижностям (спектр подвижностей).

Разработанные датчики использовались в составе аппаратной платформы при проведении полевых натуральных наблюдений на полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН [$58^{\circ}04' \text{N}$; $38^{\circ}14' \text{E}$], включавших аэростатные наблюдения высотных аэроэлектрических профилей [3, 4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №16-17-10209 (аэростатные наблюдения), Российского фонда фундаментальных исследований, грант №18-05-00233 (полевые натурные наблюдения) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2014-00155 (обсерваторские наблюдения).

Литература

1. *Анисимов С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В.* Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Изв. Вузов, Радиофизика. 2013 Т. 56 № 11–12. С. 787-802.
2. *Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В.* Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // Физика атмосферы и океана, 2014, Т.50, № 4. С. 445–454.
3. *Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Гурьев А.В.* Аппаратная платформа аэростатных аэрозлектрических наблюдений // Научное приборостроение. 2017, Т. 27, №1 С. 21–24. ISSN 0868–5886
4. *Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Прохорчук А.А., Гурьев А.В., Мареев Е.А., Шлюгаев Ю.В., Микрюков П.А.* Электрическое состояние приземной атмосферы по результатам аэростатных наблюдений // Доклады академии наук. 2018. Т. 481. № 2. С. 197–202. DOI:10.31857/S086956520001204-7.

Наблюдение турбулентных потоков газовых примесей атмосферы методом равномерного накопления микровихрей

В. А. Белоусов, И. Б. Беликов, А. И. Скорород

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

Экспериментальные наблюдения величин турбулентных потоков малых газовых примесей в приземном слое атмосферы являются в настоящее время существенно важным средством для исследования процессов антропогенного загрязнения атмосферы.

Одним из наиболее распространенных методов наблюдения турбулентных потоков газовых примесей является метод турбулентных пульсаций, или вихревой ковариации [1]. Для применения этого метода необходим акустический анемометр и быстродействующий измеритель концентрации примеси.

Недостатком этого метода является то, что не для всех климатически и химически значимых газовых примесей атмосферы существуют быстродействующие измерители их концентраций. В наибольшей мере это относится к такому классу веществ, как летучие органические соединения (ЛОС), которые, несмотря на их относительно малое содержание в атмосфере, играют важную роль в процессах химической трансформации примесей.

В последние годы получили развитие альтернативные методы наблюдения турбулентных потоков примесей, не требующие применения быстродействующего измерителя концентраций. Одним из подобных методов является метод равномерного накопления микровихрей, или установившегося вихревого накопления (англ. relaxed eddy accumulation) [1, 2].

Этот метод основан на том, что измерения концентрации примеси производятся раздельно для положительной или отрицательной скорости вертикального ветра. Разделение при измерении концентраций производится быстродействующими электромагнитными клапанами, управляемыми специализированным электронным устройством.

Особенностью применения рассматриваемого метода является относительная сложность практической реализации аппаратной части эксперимента. К настоящему времени различными зарубежными авторами разработано несколько десятков вариантов экспериментальных схем применения метода равномерного накопления микровихрей для широкого класса органических и неорганических газовых примесей атмосферы [2, 3].

В рамках данной работы разработана и изготовлена экспериментальная установка для апробации рассматриваемого метода как для таких хорошо изученных примесей, как углекислый газ и метан, так и для некоторых ЛОС, измерение концентраций которых предполагается производить с по-

мощью имеющегося специализированного прибора – т. н. протонного масс-спектрометра [4].

Экспериментальная установка [5] включает в себя акустический анемометр, быстродействующие электромагнитные клапаны, специализированное электронное устройство для управления клапанами, компрессор и блок питания. Конструктивно экспериментальная установка состоит из двух блоков, один из которых при проведении наблюдений монтируется в непосредственной близости от акустического анемометра, а другой, представляющий собой малогабаритный всепогодный шкаф, монтируется на расстоянии до 45 метров от места измерений. Блоки соединяются кабельно-трубопроводной линией. Конструктивное исполнение установки позволяет проводить наблюдения в полевых условиях и в любую погоду.

Созданная экспериментальная установка была подвергнута серии лабораторных и натурных испытаний. Проведено экспериментальное исследование быстродействия примененных электромагнитных клапанов, а также экспериментальное моделирование работы установки на примерах ранее измеренных в реальной атмосфере данных акустического анемометра. В натурных условиях проводятся экспериментальные наблюдения турбулентных потоков углекислого газа с целью апробации метода и определению оптимальных конструктивных особенностей установки для применения ее в дальнейшем для наблюдений турбулентных потоков ЛОС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-20031.

Литература

1. *Burba G., Kurbatova J., Kuricheva O., Avilov V., Mamkin V.* Handbook for the Method of Turbulent Pulsations [Метод Турбулентных Пульсаций: Краткое Практическое Руководство] - М.: IPEE, Russian National Academy of Sciences, 2016. 230 с.
2. *Businger J.A., Oncley S.* Flux measurement with conditional sampling. // J. Atmos. Ocean. Tech. 1990. V. 7. P. 349–352.
3. *Arnts R., Mowry L.R., Hampton G.A.* A high-frequency response relaxed eddy accumulation flux measurement system for sampling short-lived biogenic volatile organic compounds. // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. P. 4860–4873.
4. *deGouw J., Warneke C.* Measurements of volatile organic compounds in the earth's atmosphere using proton-transfer-reaction mass spectrometry. // Mass Spectrom. Rev. 2007. V. 26. № 2. P. 223–257.
5. *Белоусов В.А., Беликов И.Б., Скороход А.И.* Оценка турбулентных потоков климатически значимых газовых примесей атмосферы методом равномерного накопления микровихрей. // Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования: тезисы Всерос. конф. (Москва, 26–28 ноября 2019 г.) - Москва. 2019. С. 31.

Влияние стратификации по содарным данным на содержание атмосферных примесей

А. Ю. Богданович¹, М. А. Локощенко^{1,2}, Н. Ф. Еланский², Е. А. Лезина³

¹ Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

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

³ ГПБУ «Мосэкомониторинг», Москва

Известно, что задерживающие слои приподнятых инверсий сильно влияют на динамику загрязняющих веществ в воздухе крупных городов, препятствуя вертикальному турбулентному обмену [4]. Акустические локаторы (содары) благодаря их высокому разрешению дают наиболее подробную информацию о стратификации атмосферы, позволяя точно определить тип стратификации и границы инверсий [2]. Содар «ЭХО-1» (производства ГДР), работающий в Метеорологической обсерватории (МО) МГУ с 1988 года, с вертикальным диапазоном данных от 25 до 800 м и разрешением 12,5 м, позволяет обнаружить даже очень тонкие слои инверсий. Также в МО МГУ с 2004 г. работает доплеровский содар «MODOS» фирмы МЕТЕК, измеряющий скорость и направление ветра в слое от 40 до 500 метров с шагом 20 м по высоте и в среднем за каждые 10 минут [3]. Измерения состава воздуха проводились на территории МО МГУ на совместной Экологической станции ИФА РАН и Географического факультета МГУ с февраля 2002 г. по июль 2014 г. За все время работы станции получен непрерывный ряд данных о загрязнении воздуха с временным разрешением 10 мин и высокой точностью измерений; газоанализаторы станции регулярно калибровались согласно стандартам сети Глобальной службы атмосферы [1]. Кроме этого, в МО МГУ с 2003 г. и поныне работает автоматическая станция контроля загрязнения атмосферы сети ГПБУ «Мосэкомониторинг» с 20-минутным временным разрешением.

Отдельно рассмотрены два типа приподнятых инверсий: инерционные утренние приподнятые инверсии (ИУПИ) (остатки ночных приземных инверсий) и долгоживущие приподнятые инверсии (ДПИ). Анализ показал, что ИУПИ, преобладают с апреля по октябрь, тогда как инверсии оседания — в холодное время года (с ноября по февраль).

Для ИУПИ динамика малых газовых примесей анализировалась за лето 2016 г. в 6-часовом интервале: за 3 ч до и 3 ч после окончательного разрушения инверсий. За лето 2016 г. выявлено 46 случаев ИУПИ. Момент разрушения ИУПИ менялся от 07:11 до 11:47. Динамика малых газовых примесей анализировалась в 6-часовом интервале: за 3 ч до и 3 ч после окончательного разрушения инверсии. Анализ показал, что в этот момент начинается быстрое уменьшение концентрации NO_2 , тогда как рост содержания O_3 ускоряется (рост приземного O_3 начинается после отрыва инверсии от поверхности, но до её разрушения). До разрушения инверсии средняя скорость изменения O_3 составляла $+0,14 \cdot 10^{-3}$ мг/(м³·мин), тогда как в течение первых 40 мин после момента разрушения она возрастает до $+0,24 \cdot 10^{-3}$ мг/(м³·мин).

Вероятная причина эффекта — усиление нисходящего переноса O_3 к земле из вышележащих слоёв воздуха после исчезновения ИУПИ.

В отличие от ИУПИ, явного влияния ДПИ на загрязнение воздуха не обнаружено. За время совместной работы содара «ЭХО-1» и Экологической станции с 2002 по 2014 гг. выявлено 40 ДПИ, существовавших по данным содара не менее 20 ч. Самая длительная ДПИ (119 ч) зарегистрирована с 28 ноября по 3 декабря 2003 года. Для анализа общих закономерностей влияния ДПИ на загрязнение воздуха время существования инверсии от образования до разрушения делилось на 6 равных интервалов.

Статистически достоверных изменений в приземном содержании ни O_3 , ни NO_2 не выявлено. Учёт данных содар «MODOS» о скорости ветра V частично объясняет динамику загрязнений воздуха (рисунок). Уменьшение V в начале ДПИ ведет к накоплению NO_2 и уменьшению O_3 в приземном воздухе. Рост V перед разрушением ДПИ приводит к снижению NO_2 . Помимо ветра, на динамику NO_2 и O_3 могут влиять осадки, или ослабление самой ДПИ при большой высоте её основания или малой мощности. Сама по себе ДПИ, взятая в отрыве от других факторов, не приводит к направленным изменениям в составе приземного воздуха.

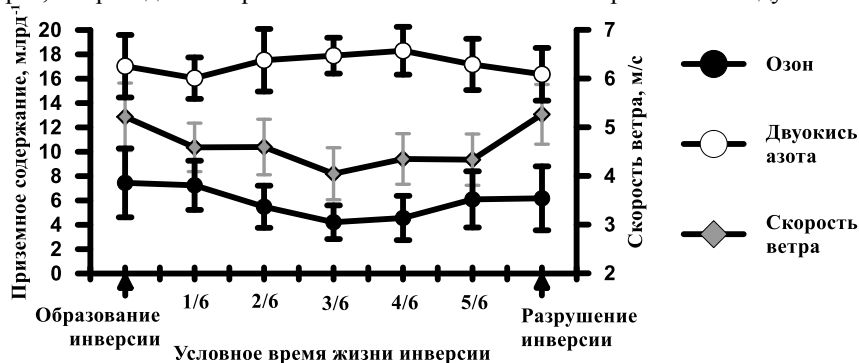


Рис. 1. Динамика приземного содержания озона и двуокиси азота в условиях долгоживущих приподнятых инверсий в нижнем 800-метровом слое воздуха. Москва, МГУ, 2002–2014 гг.

Литература

1. Еланский Н.Ф., Локоценко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скорород А.И. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой. // Известия РАН. Серия Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С.39–51.
2. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя // Томск, ИОМ СО РАН – 2001 – 280 С.
3. Локоценко М.А. О ветровом режиме нижней атмосферы над Москвой по данным многолетнего акустического зондирования. // Метеорология и гидрология. 2014. №4. С.19–31.
4. Russell P. B., Uthe E. E. Acoustic and Direct Measurements of Atmospheric Mixing at Three Sites During an Air Pollution Incident //Atm. Environment, 1978, V. 12, p. 1061–1074.

Оценка уровня загрязнения взвешенными веществами снежного покрова г. Вологды

Е. В. Булавина

Российский государственный гидрометеорологический университет, С.-Петербург

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, взвешенные частицы, содержащиеся в атмосферном воздухе, являются одним из ведущих факторов возникновения неинфекционных заболеваний у взрослого населения [1].

Депонирующие свойства в совокупности с продолжительным периодом залегания снежного покрова в высоких широтах позволяют использовать данные о загрязнении снега при оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха в зимний период. Помимо этого, изучение качества снежного покрова позволяет оценить не только уровень загрязнения атмосферы в течение зимнего периода, но и нагрузку на водные объекты в период активного снеготаяния [2].

Целью работы являлась оценка уровня загрязнения снежного покрова г. Вологда по интенсивности выпадения взвешенных веществ.

Основным источником загрязнения атмосферы в г. Вологде является автомобильный транспорт, на долю которого приходится более 80% выбросов по городу, а также предприятия теплоэнергетики, распределенные по территории города [3]. В связи с этим точки отбора проб были равномерно распределены по территории города на разной удаленности от проезжих частей и стационарных источников выбросов. Отбор проб снежного покрова производился в период максимального влагозапаса перед началом активного снеготаяния – в период с 20 по 21 марта в 2017 г. и в период с 28 по 29 марта в 2018 г.

Для оценки уровня загрязнения снежного покрова г. Вологды было произведено определение концентраций взвешенных веществ в снеговых пробах. Затем, согласно РД [4] определялась средняя интенсивность выпадения взвешенных веществ. Согласно рекомендациям [5] выделяется четыре уровня загрязнения снежного покрова взвешенными веществами (пылью) (табл. 1).

Табл. 1. Уровни загрязнения снежного покрова пылью

Уровень	Интенсивность выпадения пыли (кг/м ² /сут)
Низкий	<250
Средний	250–450
Высокий	450–850
Очень высокий	>850

Уровень загрязнения взвешенными веществами большей части отобранных проб снежного покрова оценивается как низкий (47% и 38% в 2017

и 2018 году соответственно) (рис. 1). В 2017 году значительная часть проб (34%) имели очень высокий уровень загрязнения, при этом к группам со средним и высоким уровнем загрязнения относилось 7% и 12% проб соответственно. В 2018 году количество проб, отнесенных к средним, высоким и очень высоким уровням загрязнения существенно не отличалось (22%, 16% и 23% соответственно).

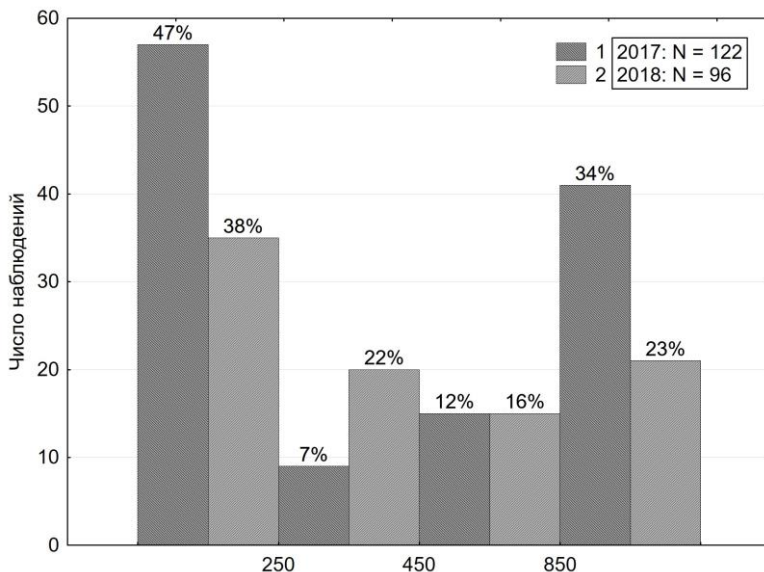


Рис. 1. Доля проб (в процентах) относящихся к различным градациям уровней загрязнения снежного покрова по интенсивности выпадения взвешенных веществ (кг/(км²*сутки)) за 2017 и 2018 гг. 1 — 2017 год, 2 — 2018 год

Литература

1. World Health Organization. Global status report on noncommunicable diseases 2014.
2. Лабузова О. М. и др. Снежный покров городской территории как источник техногенного загрязнения поверхностных вод в период снеготаяния // Принципы экологии. – 2016. – №. 4 (20).
3. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2018 году / Правительство Вологодской области, Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области - Вологда, 2019. - 261 с.
4. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы, утв. Госкомгидрометом СССР 01.06.1989 г., Гл. гос. санитар. врачом СССР 16.05.1989. – Введ. 01.07.1991.
5. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почвах, утв. Гл. гос. санитар. врачом СССР 15.05.1990.

Суточные и сезонные вариации параметров атмосферного электричества в различных регионах РФ

Б. Г. Зайнетдинов

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург

С 2008 по 2013 годы в рамках федеральной программы проводились работы по созданию новой автоматизированной аппаратуры для наблюдения за элементами атмосферного электричества, а именно напряженностью электрического поля атмосферы (E) и полярными электрическими проводимостями воздуха (λ_{\pm}) [3]. В дальнейшем данная аппаратура использовалась для модернизации и расширения сети станций наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы (ЭХА). На данный момент сеть станций наблюдений насчитывает 9 станций, а также в опытной эксплуатации находится станция «Мыс Баранова». Общие сведения об этих станциях приведены в таблице [1].

Список станций наблюдения за ЭХА

Название станции:	Широта:	Долгота:	Высота над уровнем моря:	Год начала наблюдений:
Воейково	60	30,6	72	1950
Иркутск	52,3	104,4	485	1959
Верхнее Дуброво	57,7	60,8	288	1957
Южно-Сахалинск	46,9	142,7	24	1969
Тикси	71,6	128,9	7	2013
Зашеек	67,4	32,6	151	2014
Архангельск	64,6	40,5	8	2014
о. Диксон	73,5	80,5	47	2015
Калининград	54,42	20,36	21	2015
м. Баранова	101,5	79,2	6	2017

Созданную сеть станций можно условно классифицировать по 3 группам:

1. Городские – станции, расположенные в черте крупных городов с повышенной антропогенной нагрузкой (Калининград, Иркутск, Южно-Сахалинск).
2. Континентальные – станции, находящиеся в некотором отдалении от крупных индустриальных центров, преимущественно, расположенные в поселковой зоне, где влияние человеческого фактора значительно снижено (Воейково, Верхнее Дуброво, Зашеек, Архангельск).
3. Полярные (высокоширотные) – станции, находящиеся на побережье Северного Ледовитого океана, где локальными факторами, влияющими на ЭХА, являются только различные явления погоды, такие как осадки, метели, грозы и т.п. (Тикси, Диксон, Мыс Баранова).

Данные об ЭХА на сети регистрируются с частотой 1 Гц и хранятся непосредственно на станциях. На сервер в ГГО полученные данные поступают в виде средних (E_{cp} , $\lambda_{\pm cp}$) максимальных (E_{max} , $\lambda_{\pm max}$) и минимальных (E_{min} , $\lambda_{\pm min}$) значений за минуту.

При анализе поступивших данных, а также данных о явлениях погоды, для большинства станций были выявлены некоторые закономерности в поведении ЭХА, наиболее соответствующие критериям «хорошей погоды». Так, например, на станции Диксон эти закономерности удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} 150 \leq E \leq 750, \\ E_{max} - E_{min} < 100. \end{cases} \quad (1)$$

Полученные для различных станций закономерности использовались в данной работе для автономной фильтрации данных, поступивших на сервер ГГО [2].

В работе представлены сезонные и суточные вариации ЭХА, сгруппированные по предложенной классификации. Проведен сравнительный анализ, полученных данных. Показано различие суточных вариаций в зависимости от сезона года. Также выдвинуты предположения, обосновывающие те или иные представленные результаты.

Литература

1. *Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г.* Результаты модернизации и расширения сети наблюдений за атмосферным электричеством. Труды ГГО. 2018. Вып. 589. С. 153–166
2. *Зайнетдинов Б.Г.* Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 47–61.
3. *Popov I.B., Sokolenko L.G.* New types of ground-based and airborne measuring tools for atmospheric electricity. Conference proceedings TECO-2014, St. Petersburg, July 7-9, 2014.

Наблюдения приземной концентрации CO₂ и CH₄ на арктических станциях Росгидромета

*В. М. Ивахов*¹, *Н. Н. Парамонова*¹, *Т. Лаурила*², *М. Аурела*², *А. П. Макитас*³,
*В. Ю. Кустов*³, *М. А. Лоскутова*³

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, С.-Петербург

² Финский метеорологический институт, Хельсинки

³ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, С.-Петербург

В арктическом регионе наблюдения приземной концентрации основных долгоживущих антропогенных парниковых газов (ПГ), CO₂ и CH₄, на станциях Росгидромета ведутся на 4 станциях: Териберка (Кольский п-ов, с 1988 г.), Новый Порт (п-ов Ямал, с 2004 г.), Тикси (море Лаптевых, залив Сого, с 2010 г.) и научно-исследовательский стационар «Ледовая база “Мыс Баранова”» (ЛБМБ) (о. Большевик архипелаг Северная Земля, с 2015 г.). На первых трех станциях мониторинг выполняется путем отбора проб воздуха и их анализа в лаборатории Главной геофизической обсерватории (ГГО) с помощью газового хроматографа и инфракрасного недисперсионного оптико-акустического газоанализатора. В Тикси при сотрудничестве Финского метеорологического института (ФМИ), Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), ГГО и Национального управления по делам океана и атмосферы (НУОА, США) в 2010 г. были организованы непрерывные наблюдения CO₂ и CH₄ с помощью лазерного газоанализатора, работающего на основе метода внутривибрационной лазерной спектроскопии. В рамках сотрудничества АНИИ и ФМИ на о. Большевик были запущены непрерывные наблюдения ПГ с помощью аналогичного комплекса.

Сопоставимость данных наблюдений на всех выше перечисленных станциях мониторинга достигается за счет использования прецизионного оборудования и калибровочных газовых смесей, привязанных к шкале Всемирной метеорологической организации (ВМО). Для диоксида углерода и метана требования ВМО на сопоставимость составляют ± 0.1 млн⁻¹ и ± 2 млрд⁻¹ соответственно [1].

Самый продолжительный в России ряд наблюдений атмосферной концентрации CO₂ представлен на рисунке 1. Квазигармоническая форма колебания диоксида углерода определяется сезонными факторами: фотосинтезом и дыханием растений, а также дыханием почв. Положительный тренд демонстрирует влияние антропогенных эмиссий. Согласно представленным в Таблице данным за 2016–2019 гг. на всех четырех станциях наблюдался уверенный рост диоксида углерода. За тот же период на всех станциях кроме Нового Порты концентрация метана монотонно увеличивалась. В 2019 г. межгодовой прирост был максимальным на всех станциях и составил в среднем 17.8 ± 7.1 млрд⁻¹.

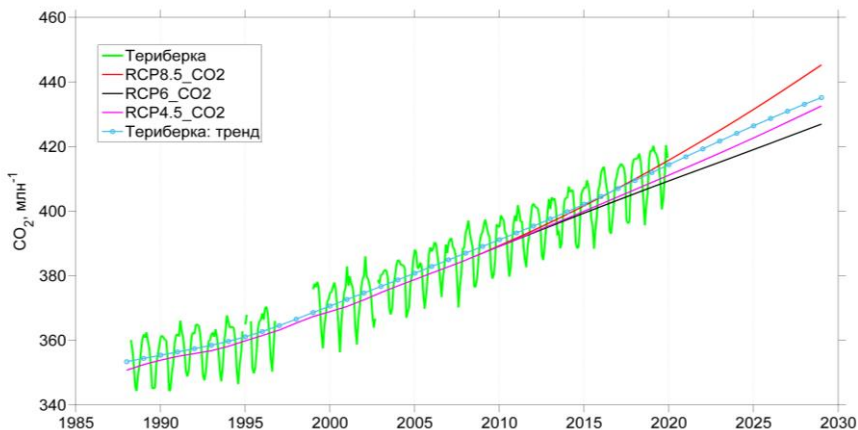


Рис. 1. Фактическая концентрация диоксида углерода в Териберке и вероятные концентрации CO_2 , соответствующие различным сценариям эмиссии CO_2 (RCP 4.5, 6, 8.5).

Фактически наблюдаемая концентрация диоксида углерода на станции Териберка указывает на то, что в настоящее время содержание углекислого газа в атмосфере арктического региона превышает концентрации, соответствующие сценариям выбросов RCP4.5 и RCP6 (см. рисунок 1), которые используются при прогнозировании климатических изменений. Простая экстраполяция тренда CO_2 показывает, что ближайшие 10 лет рост концентрации диоксида углерода продолжится, но при этом расхождение с наиболее агрессивным сценарием роста CO_2 будет увеличиваться.

Таблица. Среднегодовые концентрации CO_2 и CH_4

	CO_2 , млн ⁻¹				CH_4 , млрд ⁻¹			
	Тер	Тик	М. Б.	Н. П.	Тер	Тик	М. Б.	Н. П.
2016	405.5	406.1	405.5	410.2	1946.7	1946.4	1940.0	2024.9
2017	409.0	408.7	408.7	414.3	1947.1	1956.7	1946.9	2002.7
2018	411.1	411.3	410.5	414.1	1950.4	1960.4	1952.3	2018.7
2019	414.3	414.3	412.9	417.4	1965.1	1983.7	1961.5	2042.5

Литература

1. GAW WMO 15th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques. 2009.

Изменчивость концентрации радона-222 в приземном слое атмосферы сева­стопольского региона

Д. А. Кременчуцкий¹, Г. Ф. Батраков¹, А. В. Холопцев², Ю. С. Куринная¹

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

² Севастопольское отделение «Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова», Севастополь

Человек непрерывно облучается от ряда естественных источников излучения космического и земного происхождения. Порядка 64% от суммарной величины дозы облучения человек получает от радона-222 и его дочерних продуктов. Согласно данным Научного комитета ООН по действию атомной радиации, около 20% всех заболеваний раком легкого обусловлено воздействием радона и его продуктов распада. В тоже время радон является второй по важности причиной, вызывающей рак легкого. В связи с этим, исследования временной изменчивости концентрации радона-222 и его продуктов распада, а также процессов, определяющих эту изменчивость, представляет значительный интерес.

Мониторинг внутрисуточной изменчивости продуктов распада радона-222 в приземном слое атмосферы сева­стопольского региона проводится с мая 2016 г. Для этого используется высокопроизводительная воздухофильтрационная установка (500 м³/час). Отбор проб атмосферных аэрозолей производится с использованием фильтр-полотна Петрянова ФПП-15-1,5. Фильтродержатель расположен в герметичной камере, воздух в которую затягивается с крыши здания Морского гидрофизического института (возвышение 3 м относительно уровня крыши). Внутри фильтродержателя размещен сцинтиллок с кристаллом NaI(Tl) размером 63×63 мм. Набор гамма-спектров происходит непрерывно и каждые два часа в автоматическом режиме записывается в память компьютера. Обработка спектров производится с использованием специализированного ПО. За период наблюдений было выполнено порядка 15 000 определений активности продуктов распада радона-222 на атмосферных аэрозолях в приземном слое атмосферы сева­стопольского региона. По результатам проведенного мониторинга исследована изменчивость их активности на масштабах времени от мезомасштабного до межгодового, получены количественные оценки влияния метеопараметров на наблюдаемую временную изменчивость продуктов распада радона-222.

Исследование выполнено в рамках гос. задания Минобрнауки России № 0827-2020-0004 при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 20-45-920007.

Обработка и интерпретация геофизических данных по сети геомагнитных обсерваторий

И. П. Лавров, А. П. Макрушин

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Известные программные инструменты для обработки больших массивов данных трудно адаптировать под проведение конкретных задач. Создан пакет программ для исследования характеристик вариаций магнитного поля Земли, сейсмических и электрические поля по данным сети обсерваторий. Программа позволяет отбирать, визуализировать, проводить обработку и анализ наблюдений в интерактивном режиме. Подходы и инструменты, реализованные в программе, позволяют обрабатывать различные структуры данных, реализованные, например, в сети INTERMAGNET и в базах сейсмических данных. Методы, используемые для анализа, основываются на топологической, геометрической и геофизической информации о процессах и их статистическом анализе. В частности, для оценки особенностей и степени когерентности вариаций геомагнитного поля с сейсмическими процессами в различных регионах Земли, построены матрицы корреляции, позволяющие получить оценку возможной связи указанных процессов.

О возможности мониторинга малых газовых примесей в атмосфере с помощью малых космических аппаратов

*А. В. Карелин, А. А. Асташкин, Ю. А. Кузьмин, Ю. А. Пластинин,
С. А. Матвеев, Е. А. Лапшин
АО «ЦНИИмаш», Королёв*

На современном этапе развития космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) пользователи космической информации (КИ) требуют повышения периодичности получения данных вплоть до получения КИ в близком к реальному масштабу времени.

Для КС на низких и средних солнечно-синхронных орбитах (ССО) выполнение этих требований связано с созданием орбитальных группировок (ОГ) в количестве до сотен космических аппаратов (КА) в системе. В перспективе в состав КС ДЗЗ наряду с традиционными КА тяжелого класса должны войти подсистемы малых спутников, образуя единую многоспутниковую космическую информационную структуру, объединяющую ряд космических систем различного тематического назначения. КС может включать в себя ряд подсистем микроспутников (МС): МС высокого и среднего разрешения (3–10 м); подсистему мониторинга пожароопасных районов в ИК-диапазоне; подсистему гиперспектрального экологического наблюдения; подсистему радиопросвечивания атмосферы для получения данных о температурных профилях атмосферы и о возмущениях ионосферы; подсистему МС с массой КА на орбите 100–150 кг для получения высокодетальных изображений с разрешением ~ 1,0 м.

Приведены примеры и показаны возможности создания приборов и платформы для сверхмалых космических аппаратов (СМКА) различной тематической направленности. Так, в АО «ЦНИИмаш» разработан гиперспектрометр для определения газового состава атмосферы Земли, весовые и габаритные параметры которого позволяют установить его на микро КА (массой менее 120 кг) [1, 2]. Гиперспектрометр определения газового состава атмосферы решает задачу определения содержания аэрозолей и малых газовых составляющих в тропосфере и стратосфере Земли и осуществляет мониторинг их физико-химической трансформации.

Литература

1. *Брычихин М.Н., Лобода Я.О., Пластинин Ю.А. и др.* Спектрометр определения газового состава и содержания аэрозолей в атмосфере Земли для перспективного космического аппарата «Метеор-МП» // Научно-технический журнал «Констант». 2013. Т. 2. № 3.
2. *Брычихин М.Н., Кривошеин В.В., Кротков А.Ю. и др.* Гиперспектрометр СА-МП для определения молекулярного и аэрозольного содержания в атмосфере Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 8 (93). С. 110–116.

Анализ измерений концентрации диоксида углерода в приземном слое на НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”» за 2015 – 2019 гг.

*М. А. Лоскутова*¹, *А. П. Махитас*¹, *Т. Лаурилла*², *Э. Асми*²

¹ Институт Арктики и Антарктики, Санкт-Петербург

² Финский Метеорологический Институт, Хельсинки

В работе отражены результаты непрерывных измерений концентрации углекислого газа в приземном слое за 2015–2019 гг., проводимых ААНИИ на НИС «Ледовая база «Мыс Баранова» (79°16' с. ш., 101°37' в. д.) совместно с Финским метеорологическим институтом. Для измерений использован лазерный газоанализатор G2401 Picarro, пробоотборный модуль которого закреплен на измерительной мачте на высоте 10 м [1]. Подготовка данных для дальнейшего анализа включала в себя введение поправки для учета дрейфа шкалы прибора в соответствии с требованиями ВМО по сопоставимости данных [2], а также отбраковку измерений при направлении ветра из сектора расположения дизельной электростанции (95°–145°) и при скорости ветра менее 3 м/с, поскольку в этом случае велика вероятность равномерно-го распределения загрязнения над базой.

Анализ ряда наблюдений позволяет заключить, что для НИС характерны амплитуды (18–20 млн⁻¹), среднегодовые значения (409–411 млн⁻¹) и тренды (1.8–2.2 млн⁻¹), хорошо согласующиеся с показаниями арктических прибрежных станций Барроу и Алерт [3], а также со значениями, заявленными в официальном Бюллетене парниковых газов ВМО за 2019 год [4]. Что касается суточной изменчивости, то на данном этапе анализа ее выявить не удалось. Вероятно, повышенные значения концентраций обоих газов в отдельные часы в зимний период связаны с наличием устойчивой стратификации в зимний период, однако для проверки этого предположения предстоит провести дополнительные расчеты.

Литература

1. *Махитас А.П., Лаурилла Т., Асми Э., Кустов В.Ю., Мовчан В.В.* Российско-финские исследования характеристик аэрозоля и парниковых газов в приземном слое атмосферы на НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”». //Российские полярные исследования. 2015. Выпуск 4 (22). С. 29–30.
2. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch. Report № 206. 2012.
3. World Data Centre for Greenhouse Gases [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>
4. World Meteorological Organization Greenhouse Gas Bulletin, 2019. Vol. 14 (22). P. 1–8.

Особенности обработки спутниковых данных миссии MMS

И. П. Лавров, А. П. Макрушин

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

В последние несколько лет существенная информация о взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли получена со спутников миссии MMS. Для исследования одновременно наблюдаемых процессов в солнечном ветре и МГД-колебаний на поверхности Земли нами создана программа, позволяющая обрабатывать большие массивы данных, отражающие местоположение спутников MMS, параметры космической плазмы и наблюдения наземных обсерваторий. Основное внимание было уделено анализу стохастических процессов на передней границе магнитосферы и их связи с вариациями геомагнитного поля высоких широт. Это позволило предложить простую модель влияния флуктуаций солнечного ветра на альвеновские волны, возникающие в результате процессов пересоединения на магнитопаузе.

Характеристики многолетней изменчивости концентраций взвешенных веществ в атмосферном воздухе г. Вологды

И. Н. Павлов

Российский государственный гидрометеорологический университет, С.-Петербург

Взвешенные вещества относятся к атмосферным загрязнителям, для которых установлена связь между их повышенным содержанием и целым рядом заболеваний [1]. За счет токсического воздействия разнообразных компонентов входящих в их состав, взвешенные вещества оказывают негативное воздействие, как на дыхательную систему, так и а другие системы и органы человека [2].

Целью данного исследования является оценка многолетней динамики концентраций взвешенных веществ в атмосфере г. Вологды.

Для анализа многолетних трендов использовались результаты определения разовых концентраций взвешенных веществ, на постах Государственной сети наблюдения в г. Вологде произведенных в период с 2001 по 2019 г. На обоих постах наблюдения была выявлена тенденция увеличения средних годовых концентраций взвешенных веществ (рис. 1).

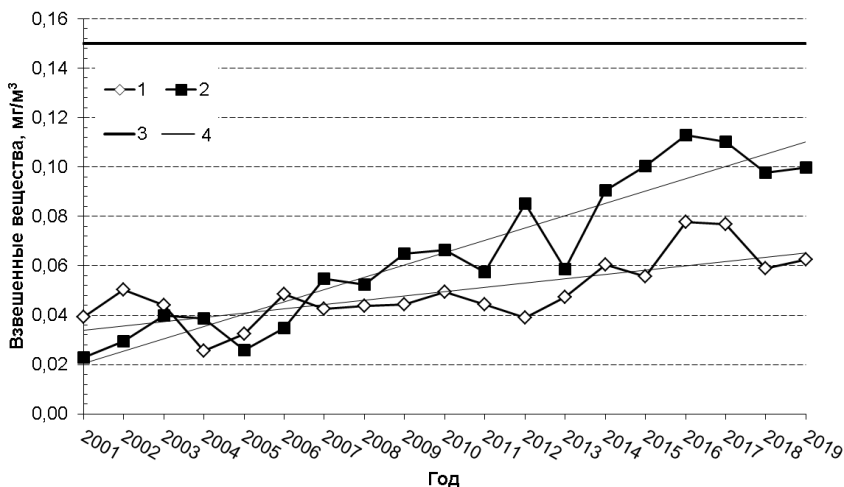


Рис. 1. Средние годовые концентрации взвешенных веществ ($\text{мг}/\text{м}^3$) на постах наблюдения г. Вологды в период с 2001 по 2019 г.
1 — пост 1, 2 — пост 2, 3 — ПДК_{с.с.}, 4 — линейные тренды.

Вклад многолетних трендов в межгодовую изменчивость неоднороден и наиболее выражен в весенние месяцы на посту 2 (табл. 1).

Таблица. Параметры линейного тренда средних месячных концентраций взвешенных веществ (мг/м³)

Месяц												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Пост 1												
b	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
D	17	11	37	13	38	54	11	10	5	10	42	48
Пост 2												
b	0,04	0,04	0,06	0,07	0,06	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
D	70	67	83	84	73	70	22	59	68	73	69	76
<i>Примечание.</i> b — коэффициент тренда (мг/м ³ за 10 лет), D — вклад тренда в суммарную дисперсию												

Произведено сопоставление значений средних годовых концентраций взвешенных веществ с данными об объемах выбросов стационарных источников и автомобильного транспорта, а также с количеством личных автомобилей на 1000 человек населения. Выявлено, что в наибольшей степени средние годовые концентрации взвешенных веществ коррелируют с числом личных автомобилей ($r = 0,72$ и $0,93$ для поста 1 и поста 2 соответственно), при этом связь между уровнем загрязнения и расчетными объемами выбросов автотранспорта практически отсутствует. Заметное влияние ($r = 0,51$) на уровень загрязнения взвешенными веществами на посту 1 оказывают выбросы стационарных источников, что может быть связано с большим числом котельных с низкими источниками выбросов расположенных в районе расположения данного поста наблюдения.

Литература

1. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. Значение для разработки политики в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии // Всемирная организация здравоохранения. Европейское региональное бюро. — 2013. — 15 с.
2. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России в 2018 г.: ежегодник / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гл. геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова; подготовлен Ануфриевой А. Ф. [и др.]. — 2019. — 250 с.

Исследование спектра аэрозолей в степной и высокогорной зонах Северного Кавказа

*Т. С. Поповская, Е. В. Егоров, А. В. Шевченко, А. И. Купинская,
И. Н. Панчишкина, А. И. Петров*

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Изучение аэрозольного спектра в различных физико-географических условиях является важной задачей как для понимания сущности физических явлений, протекающих в атмосфере, так и для построения математических моделей. Актуальность этих исследований связана с необходимостью прогнозирования динамики процессов эмиссии и распространения аэрозолей в атмосфере для учета влияния аэрозолей на климат и природные экосистемы. Свойства аэрозолей определяются природой вещества, из которого состоят частицы, размером, формой и зарядом частиц, а также счетной концентрацией аэрозоля.

В совместных летних экспедициях Южного федерального университета и Института физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН измерения концентрации аэрозолей в шести размерных диапазонах (0,1–0,2; 0,2–0,3; 0,3–0,4; 0,4–0,5; 0,5–0,7; > 0,7 мкм) производились с помощью лазерного спектрометра ЛАС-П на территории научных станций ИФА: Цимлянкой (ЦНС) в 2017 г. и Кисловодской высокогорной (КВНС) в 2018–2019 гг. В степном засушливом районе Ростовской области, где расположена ЦНС, аэрозоли, в основном, диспергационной природы образуются при ветровом выносе частиц с поверхности почвы и при степных пожарах. На плато Шаджатмаз (КВНС), где подстилающая поверхность покрыта густым травостоем, а условия типичные для высокогорья со сравнительно низкими температурами и высокой влажностью, аэрозольная компонента представлена преимущественно конденсационными частицами.

В работе представлен анализ вариаций счетной концентрации аэрозолей в пунктах наблюдений в летний период и распределение аэрозольных частиц по размерам для различных метеоусловий. Для сравнения приведены обобщенные данные размерных спектров аэрозольных частиц, полученные Смирновым В.В. [1] для континентальных станций. Обнаружено, что концентрация аэрозольных частиц в периоды, когда отмечались помутняющие атмосферу факторы оказалась в среднем выше, чем при ясной атмосфере в полтора-два раза во всех размерных диапазонах.

Литература

1. *Смирнов В.В.* Ионизация в тропосфере. — СПб.: Гидрометеоздат, 1992. — 311с.

Оценка сокращения уровня загрязнения атмосферы в Санкт-Петербурге в результате реализации мер по ограничению содержания серы в топливе морских судов на Балтике в рамках Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78)

Д. Ю. Румянцев

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург

Судовые выбросы являются одним из источников загрязнения атмосферного воздуха над акваториями морей и океанов и вблизи них. В соответствии с Приложением VI к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78), вступившем в силу в 2005 г., все морские суда под флагами стран, ратифицировавших Конвенцию (они составляют до 99% тоннажа мирового морского флота [1]), обязаны исполнять требования по охране воздушного бассейна, изложенные в вышеназванном документе. Среди прочего, к таким требованиям относится уменьшение выбросов оксидов серы при нахождении в Зонах особого контроля за выбросами серы (SECA). На 2020 г. в мире существуют четыре зоны SECA: две из них расположены в Европе в Балтийском и Северном море, другие две – вдоль побережий США и Канады в Атлантическом и Тихом океане. При этом регулирование выбросов осуществляется путем поэтапного введения ограничений на максимально допустимое содержание серы в судовом топливе. В частности, начиная с 1 января 2015 г. это значение было снижено с 1,0% до 0,1% по массе [2].

Настоящее исследование выполнено в рамках международного проекта EnviSuM [3], проводимого Программой трансграничного сотрудничества «Интеррег. Регион Балтийского моря» [4], и направлено на обнаружение и определение степени возможного влияния указанных ограничительных мер на величину среднегодовых концентраций оксидов серы, азота и окиси углерода в Санкт-Петербурге как в портовом городе России на Балтийском море. В работе сравнивались среднегодовые концентрации SO_2 , NO_x и CO за 2014 и 2016 годы, до и после вступления в силу упомянутых выше ограничений соответственно, рассчитанные с помощью химической транспортной модели ХТМ_ГГО [5]. Расчёт производился для двух вариантов задания исходных данных: в первом варианте учитывались как корабельные источники выбросов, так и выбросы городских предприятий и автотранспорта, во втором варианте учитывались только корабельные источники. Также был проведен анализ модельных результатов на соответствие данным инструментальных наблюдений на сети автоматических станций мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга.

Получено, что при учёте всех источников расчетная среднегодовая концентрация диоксида серы в Санкт-Петербурге в 2016 году уменьшается на 1,2% по сравнению с 2014 годом, изменение концентрации СО и NO_x пренебрежимо мало. В то же время при учёте только судовых источников (Большой порт Санкт-Петербурга, реки и каналы, Морской канал) среднегодовая концентрация SO₂ уменьшается на 74,6%. Анализ функций распределения измеренных на станциях мониторинга и модельных концентраций показал, что их 99,5 процентиля находятся в удовлетворительно соотносятся друг с другом, а в целом модельные данные и данные наблюдений согласуются в пределах коэффициента 2.

Литература

1. Status of Treaties. [Электронный ресурс]. – London: International Maritime Organization, 2020. – Режим доступа: <http://www.imo.org/en/About/Conventions/StatusOfConventions/Documents/StatusOfTreaties.pdf>. (Дата обращения: 13.03.2020).
2. МАРПОЛ 73/78. Приложение VI (пересмотренное) к Конвенции "Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов". [Электронный ресурс]: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Электрон. дан. – СПб.: АО «Кодекс», 2012. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499014496>. - Электронная версия печ. публикации. (Дата обращения: 13.03.2020).
3. EnviSuM. Environmental impact of low sulphur ship fuel: measurements and modeling strategies (2016–2018) [Электронный ресурс] // Baltic Marine Environment Protection Commission (Helsinki Commission – HELCOM). – Helsinki, 2016. – Режим доступа: <https://helcom.fi/helcom-at-work/projects/envisum>. (Дата обращения: 13.03.2020).
4. Interreg Baltic Sea Region [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.interreg-baltic.eu/home.html>. (Дата обращения: 13.03.2020).
5. *Генихович Е.Л., Грачева И.Г., Зив А.Д., Румянцев Д.Ю.* Разработка мезомасштабной/региональной химической транспортной модели ГТО (XTM_ГТО) // Труды ГТО.–2016.–Вып. 580.–С. 54–81.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Моделирование климата настоящего, прошлого и будущего с помощью моделей климатической системы ИВМ РАН

Е. М. Володин, А. С. Грицун

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

Рассматривается воспроизведение изменений климата в 20 и начале 21 веков, вероятные будущие изменения климата в 21 веке при различных сценариях развития человечества, и климаты прошлых эпох, например, предыдущего (микулинского) межледниковья, и эоцена. Результаты, полученные с помощью модели ИВМ РАН, сравниваются с данными других климатических моделей, проводивших такие эксперименты. Показано, что результаты моделирования во многом зависят от чувствительности климатической модели. Рассматривается рост глобальной температуры в 20 – начале 21 века и другие особенности изменений климата в современную эпоху и их зависимость от чувствительности. Показано, что амплитуда естественных колебаний климата также зависит от равновесной чувствительности климатической модели. Рассматривается изменение площади арктического льда во время микулинского межледниковья для различных климатических моделей, а также равновесный климат эоцена.

Рассматриваются причины различия равновесной чувствительности климатических моделей. Вводится понятие величины обратной связи в климатической системе и анализируются величины различных обратных связей. Показывается, что основной причиной различной чувствительности является различная величина и знак обратных связей изменения температуры с нижней и верхней облачностью. Показано, как можно сделать чувствительную и менее чувствительную климатическую модель.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 20-05-00673.

Крупномасштабные структуры в устойчиво стратифицированных турбулентных течениях

*А. В. Глазунов^{1,2}, Е. В. Мортиков², Г. В. Засько^{1,3}, Ю. М. Нечепуренко¹,
С. С. Зилитинкевич^{4,5}*

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

² Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

³ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

⁴ Финский метеорологический институт, FMI, Хельсинки, Финляндия

⁵ Институт Атмосферных и земных систем (INAR), Университет Хельсинки, Финляндия

Проанализированы данные численного моделирования устойчиво-стратифицированных турбулентных течений со сдвигом скорости. Показано, что, наряду с хаотической турбулентностью, течения содержат крупные организованные структуры. В поле температуры эти структуры проявляются как наклонные слои жидкости со слабо-устойчивой стратификацией, разделенные очень тонкими слоями с большими градиентами температуры. Существование подобных слоистых структур в природе косвенно подтверждается анализом данных натурных измерений. В моделях зафиксирован рост турбулентного числа Прандтля при увеличении градиентного числа Ричардсона. Предлагается гипотеза, что именно эти структуры и служат физическим механизмом поддержания турбулентности при сверхкритически устойчивой стратификации. Для объяснения механизмов формирования выявленных организованных структур и определения их пространственных масштабов и конфигурации применена теория оптимальных возмущений.

Работы выполнены при поддержке РФФИ (гранты 18-05-60126, 18-05-60299, 20-05-00776) и проекта Финской Академии ClimEco No. 314 798/799 (2018–2020).

Математические аспекты моделирования изменений климата

А. С. Грицун

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

Двумя основными вопросами, связанными с исследованием отклика климатических моделей (или реальной климатической системы) на внешние воздействия, являются возможность его описания с помощью линейных соотношений и с помощью статистических характеристик исходной невозмущенной системы. Данные результаты гарантируются для так называемых гиперболических динамических систем в рамках теории «линейного отклика» Рюэля и обобщенной флуктуационно-диссипационной теоремы (ФДТ) [1]. Климатические системы, являясь хаотическими диссипативными динамическими системами, формально не относятся к классу гиперболических, тем самым применение линейной теории и ФДТ для описания их отклика на внешние возмущения может быть некорректным. В данной работе, на примере модели крупномасштабной динамики атмосферы, будут проиллюстрированы такие ситуации.

В первом случае рассматривается изменение локальной структуры аттрактора модели при изменении ее параметров. Проводится анализ неустойчивых периодических орбит модели – набора замкнутых траекторий, аппроксимирующих динамику и статистические характеристики модели [2, 3]. Показано, что даже при небольших изменениях параметров происходят локальные бифуркации части таких орбит, вызывая нелинейные изменения локальных характеристик системы.

Второй пример иллюстрирует тот факт, что аттрактор модели фрактален вдоль части направлений (т.н. устойчивых многообразий) и естественная изменчивость системы вдоль них отсутствует. Если воздействие на систему осуществляется вдоль таких направлений, то использование ФДТ может приводить к большим ошибкам в определении отклика системы. Действительно, при изменении параметризации орографии или внешнего форсинга в модели, имеет место резонансный отклик системы в форме планетарной волны Россби с периодом 2.5 дня и характерным волновым числом единица. Его пространственная структура и частота изменения не совпадает при этом с ведущими модами изменчивости невозмущенной системы и не описывается с помощью ФДТ [4].

Литература

1. *Ruelle, D.* Smooth dynamics and new theoretical ideas in nonequilibrium statistical mechanics // *J. Statist. Phys.* 1999. V. 95. P. 393–468.
2. *Auerbach, D., Cvitanovic, P., Eckmann, J.-P., Gunaratne, G., Procaccia, I.* Exploring chaotic motion through periodic orbits // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. P. 2387–2389.
3. *Gritsun A.* Unstable periodic trajectories of a barotropic model of the atmosphere // *Rus. J. of Num. Anal. Math. Modelling.* 2008. V. 23. №4. P. 345–367.
4. *Gritsun, A., Lucarini, V.* Fluctuations, response, and resonances in a simple atmospheric model // *Physica D.* 2017. V. 349, P. 62–76.

Климатические различия, опасные природные явления и «острова тепла» в крупнейших городах России и Индии

*М. А. Локощенко^{1,2,3}, Н. Ф. Еланский², Л. И. Алексеева¹, Е. А. Енукова³,
А. Ю. Богданович¹, К. Ч. Гоуда⁴*

¹ Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

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

³ Государственный университет «Дубна», Дубна, Московская область

⁴ CSIR Fourth Paradigm Institute (C-MMACS), Bangalore, India.

Сравнительный анализ климатических условий средних широт и тропиков особенно насыщен в свете происходящего глобального потепления климата. Помимо прочего, оно способствует увеличению повторяемости аномально тёплой погоды. Опасное явление аномальной жары в Индии отмечается довольно часто (32 раза с 1951 по 2015 гг.), обычно в мае или начале июня, но длится недолго (в среднем – 6 дней), поскольку прерывается приходом летнего муссона, приносящего похолодание. В силу этого число жертв аномальной жары в Индии не слишком велико: менее 5 тыс. человек за время двух сильнейших её эпизодов в 1998 и 2015 годах. В средних широтах такого природного ограничителя продолжительности аномальной жары нет, и она происходит хоть и реже, но более опасна, поскольку в принципе может продолжаться в течение всего тёплого сезона. Так, аномальная жара летом 2003 г. в Западной Европе унесла жизни ~70 тыс. чел, в России летом 2010 г. ~55 тыс. чел.

Опасное явления шквала в Московском регионе с 1984 по 2018 гг. было отмечено лишь 29 раз, и только с мая по август (рис.1). В Индии за три года (с 2013 по 2015 гг.) шквалы отмечались 202 раза, в т. ч. 160 раз – одновременно с грозами. Все они произошли в предмуссонный жаркий сезон с марта по июнь. Различие условий Индии и европейской части России проявляется в том, что максимум повторяемости шквалов в годовом ходе в Индии смещён из-за летнего муссона на весенние месяцы; в Московском же регионе шквалы почти всегда отмечаются летом. Максимальный порыв ветра V_{\max} при шквалах составляет здесь 30 м/с (отмечен во Внуково 29 мая 2017 г.); в Индии он достиг 33,3 м/с в штате Гуджарат 13 марта 2015 г. Однако и там случаи $V_{\max} \geq 30$ м/с крайне редки: ещё только четыре раза, в апреле 2013 и мае 2014 гг., V_{\max} в Индии превысил 30 м/с. В суточном ходе как в Индии, так и в России шквалы отмечаются чаще во второй половине дня вследствие сильной в это время термической конвекции. Таким образом, основные различия в условиях Московского региона и Индии заключены в календарных границах этого явления в годовом ходе.

Грозы в Москве по данным Метеорологической обсерватории МГУ отмечаются в среднем 37 раз в течение 26 дней в году; чаще всего, как и шквалы, – с мая по август. В последние десятилетия повторяемость их в

Москве сокращается, но уменьшение это медленное и статистически незначимое. В Индии повторяемость гроз в целом больше, но сильно различается в зависимости от региона.

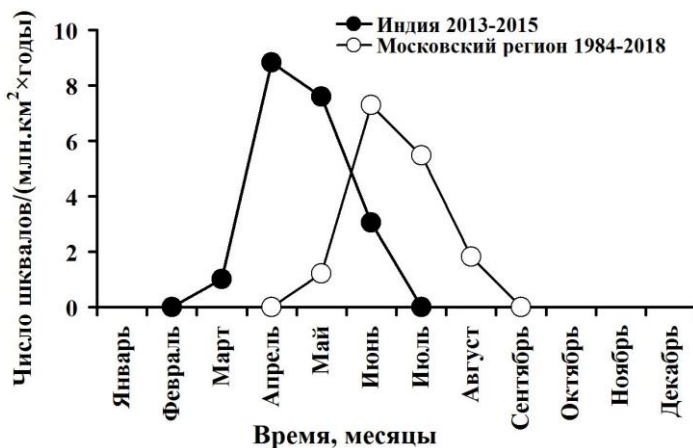


Рис. 1. Годовой ход повторяемости шквалов в Индии и в Московском регионе.

Городские «острова тепла» Дели и Бангалора выражены сравнительно слабо. Интенсивность «острова тепла» Бангалора в поле минимальной температуры воздуха ΔT_{\min} по данным двух станций в центре города и на окраине в среднем за 1975–2003 гг. составляет лишь $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для сравнения, в Москве $\sim 1,5 \div 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$). В годовом ходе «остров тепла» Бангалора почти не проявляется во время летнего муссона с июня по август ($\Delta T_{\min} < 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$); затем его интенсивность растёт вплоть до марта ($1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), после чего резко уменьшается к июню. С 1975 до 2003 гг. «остров тепла» Бангалора усилился: среднегодовое значение ΔT_{\min} устойчиво росло со средней скоростью $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. В поле максимальной температуры T_{\max} «остров тепла» не выражен: напротив, в среднем T_{\max} больше за городом – возможно, вследствие городской дымки, экранирующей солнечную радиацию. Данные спутников Terra и Aqua о температуре поверхности в пределах города и в окружающей местности доступны лишь с октября по март в Бангалоре и с сентября по май в Дели, когда облачность мала. Согласно этим данным за 2017 и 2018 гг., в Дели температурная аномалия в поле $T_{\text{п}}$ почти не выражена: средняя разность в городе и за городом $\Delta T_{\text{п}} = -0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. В Бангалоре в среднем за два года $T_{\text{п}} = -1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. поверхность города является «островом холода». Возможными причинами этого служат значительное озеленение обоих городов, а также плотная застройка в их пригородной зоне.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 18–55–45012 и РНФ № 16–17–10275.

Эмпирическое динамическое моделирование климата прошлого: реконструкция механизма изменения климата в среднем плейстоцене

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Выяснение причины климатического перехода среднего плейстоцена (ПСП), состоящего в установлении высокоамплитудных пилообразных колебаний глобального климата (ледниковых циклов) с характерным масштабом 100 тыс. лет взамен более регулярных и симметричных колебаний с периодом 41 тыс. лет, в настоящее время относится к нерешенным проблемам палеоклиматологии. В лекции излагается новый метод реконструкции динамической модели данного явления на основе байесова анализа данных наблюдений – композитного ряда концентрации 18-го изотопа кислорода, сконструированного из данных донных отложений (LR04 stack), и обсуждаются полученные с помощью этого метода результаты. Получено, что 100-тысячелетние ледниковые циклы возникли в среднем плейстоцене благодаря изменению собственной динамики климатической системы плейстоцена под действием медленного тренда, приведшему к установлению релаксационных колебаний, индуцированных быстропеременными климатическими процессами. Выявлено, что осцилляции орбитальных параметров («the orbital Milankovitch forcing») не имеют отношения к ПСП. Показано, что единственным существенным орбитальным внешним воздействием в плейстоцене является меридиональный градиент инсоляции, определяемый колебаниями угла наклона земной оси по отношению к эклиптике с периодом 41 тыс. лет. Объяснен динамический механизм как самого ПСП, так и синхронизации больших ледниковых циклов сигналом инсоляции после ПСП. Новый подход к построению модели динамической системы по данным может использоваться для верификации климатических моделей из первых принципов, в том числе - для оценки адекватности механизмов ПСП, предлагаемых в рамках многочисленных существующих концепций.

К пониманию динамики океана и морского льда Северного Ледовитого океана: Многомасштабная физика и вопросы численного моделирования

Н. Г. Яковлев

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

В докладе обсуждаются некоторые современные проблемы физики Северного Ледовитого океана и морского льда и связанные с этим вопросы численного моделирования. Основная задача доклада: показать широкий спектр научных и технологических проблем.

Северный Ледовитый океан (СЛО) является одним из наименее изученных регионов в мире. Сеть наблюдений, несмотря на впечатляющий прогресс в части дистанционных и автоматизированных методов измерений состояния среды. Дополнительную сложность вносит то, что наблюдаемые изменения глобального климата приводят к структурной перестройке полярной климатической системы, что обесценивает накопленные эмпирические знания и статистические зависимости, построенные на климате прошлого. Вот почему сложные численные модели, построенные на основе первых физических принципов, имеют большое значение для диагностики, мониторинга и прогнозирования состояния СЛО.

В докладе приводится описание наиболее существенных особенностей СЛО с точки зрения крупномасштабного распределения температуры, солёности, скорости течений, и характеристик морского льда.

Рассматриваются вопросы общей гидротермодинамики высокоширотного океана: характерные масштабы мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей, роль внутреннего прилива и возможная роль дифференциальной диффузии. Основная идея состоит в том, что маленькие пространственные масштабы мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей приводят к тому, что разработка параметризаций типа квази-Стоксова переноса для скаляров и параметризаций типа «backscatter» для кинетической энергии остается актуальной в том числе и для моделей с высоким пространственным разрешением (порядка 1-5 километров)

В связи с необходимостью выбора высокого пространственного разрешения обсуждаются актуальные проблемы воспроизведения циркуляции СЛО в крупномасштабных численных моделях, построенных на предположениях о квазистатике.

Рассматриваются современные подходы к описанию нелинейных динамики (в предположении вязко-пластичной реологии) и термодинамики солёного морского льда, и методы численного решения соответствующих задач. Обсуждаются ограничения современных физических моделей реологии льда при переходе к высокому пространственному разрешению.

Отдельно рассматриваются вопросы моделирования неоднородного пограничного слоя под льдом. Показывается, что параметризации подсеточных процессов конвекции под льдом с трещинами имеет большое значение для воспроизведения климата СЛО и Северной Атлантики. Рассматривается модельная задача о динамике солёностного плюма под трещиной и показывается, что неоднородность пограничного слоя приводит к стабилизации плотностной стратификации подо льдом. Дается представление о роли стратификации подледного слоя для сопротивления дрейфу.

В заключение приводятся постановка задачи и примеры расчетов по регионализации результатов воспроизведения климата Северного Ледовитого океана моделью Земной системы INMCM5 с помощью региональной модели FEMAO2.0-WRF-ARW.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ-18-05-60184 Арктика.

Оценка вклада углекислого газа в наблюдаемый рост приповерхностной температуры воздуха

М. А. Алимпева, Е. В. Завьялова

Саратовский государственный университет, Саратов

По данным информационного бюллетеня [1] уровни углекислого газа в атмосфере являются самыми высокими за последние 800 000 лет, а глобальная средняя температура поверхности достигает рекордных значений [1].

Проводимые по различным климатическим моделям расчеты показывают неуклонный монотонный рост средней приповерхностной температуры воздуха, который в большинстве случаев объясняется антропогенным влиянием парниковообразующих газов, в первую очередь, указывается диоксид углерода [2].

На настоящий момент важной научной задачей остается выяснение роли и относительного вклада антропогенного фактора [3].

Авторы настоящего исследования считают, что к решению поставленной задачи можно использовать дисперсионный анализ, примененной С. В. Морозовой [2]. Данный анализ позволяет оценить значимость одной величины на другую [4].

В качестве исследуемого фактора взяты аномалии приповерхностной температуры воздуха Северного полушария, взятые с сайта (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/#datdow>). В качестве фактора, оказывающего влияние на изменения приповерхностной температуры – содержание углекислого газа в атмосфере ([https:// climate.copernicus.eu/](https://climate.copernicus.eu/)). Сравнение дисперсий проводилось по формуле:

Расчеты проводились с 1980 по 2018. Согласно проведенным расчетам, на исследуемом временном интервале вклад углекислого газа в изменчивость средней полушарной температуры оценен 87%.

Литература

1. Изменение климата. Информационный бюллетень. М.: Росгидромет. 2018. № 72. 17 с.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 1535.
3. *Morozova S.V. et al.* Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental. 2018. Volume 107. 2018. P. 1–8.
4. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. Высшая школа, Москва, 1972. С. 345–349.

Анализ предсказуемости погоды на сезонном временном масштабе для климатической модели ИВМ РАН

В. В. Воробьева¹, Е. М. Володин²

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

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

Одним из важных требований к математической модели Земной системы в последние годы становится концепция бесшовного прогнозирования [1], т. е. универсальности использования модели для составления прогнозов погоды и климата различной заблаговременности. Данная работа посвящена оценке качества сезонного прогноза, выполненного с помощью климатической модели ИВМ РАН, разработанной и используемой до сих пор для получения долгосрочных климатических прогнозов.

В докладе описывается схема подготовки набора начальных данных для проведения модельных экспериментов на сезонном временном масштабе и проблемы, возникшие на пути их построения. Проводится анализ полученных результатов.

Большую роль в качестве прогностической информации играет предсказательная способность модели по отношению к различным климатическим индексам. Например, известно, что индекс Северо-Атлантического колебания NAO [2] связан с изменением направления и скорости ветра между регионами Арктики и субтропической Атлантики, что влияет на сезонный перенос тепла и влаги между Атлантикой и соседними континентами, положение шторм-треков, температуру поверхности океана, океанические течения и ледяной покров арктического и субарктического региона [3]. Индекс Тихоокеанско-Североамериканского колебания PNA [4] определяет атмосферную циркуляцию, температуру и осадки на севере Тихого океана и над Северной Америкой и связан с эпизодами Эль-Ниньо-Южного колебания [5], что позволяет говорить о важности хорошей предсказуемости индекса для всей климатической системы. В данной работе на основе прогнозов на зимние сезоны 1979-2014г.г. вычислены индексы NAO, PNA, исследуется отклик на Эль-Ниньо, оценивается предсказуемость изменчивости стратосферы, правильность отображения фазы квазидвухлетнего колебания. Полученные оценки сравниваются с аналогичными результатами, полученными по данным реанализа ERA-Interim и полулагранжевой глобальной конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛИАВ ФГБУ «Гидрометцентр России» [6], используемой для рутинных сезонных прогнозов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-05-00673).

Литература

1. *Hoskins B.* The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2013 V. 139 № 672. P. 573–584.
2. *Hurrell J. W., Deser C.* North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation // J. Mar. Syst. 2009. V. 78, №. 1. P. 28–41.
3. *Hurrell J. W. et al.* The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact // Geophysical Monograph Series, 134. American Geophysical Union, Washington, DC, 2003. 279 p.
4. *Wallace J. M., Gutzler D. S.* Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // Mon. Wea. Rev. 1981. № 109, 784–812.
5. *Renshaw A.C., Rowell D.P., Folland C.K.* Wintertime low-frequency weather variability in the North Pacific–American Sector 1949–93 // J. Clim. 1998. V. 11. P. 1073–1093.
6. *Толстых М.А.* Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М, Обнинск: ОАО ФОП. – 2010 – 111 с.

Оценка биоклиматических условий Калининграда

А. А. Иванова, Н. А. Мирсаева

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Произведена оценка биоклиматических условий Калининграда на основе следующих показателей: эффективная температура (ЕТ), эффективно-эквивалентная температура (ЭЭТ), радиационно-эквивалентно-эффективная температура (РЭЭТ), нормально-эквивалентно-эффективная температура (НЭЭТ), индекс суровости погоды по Бодману (S), биологически активная температура (БАТ), индекс ветрового охлаждения Сайпла-Пассела [1].

Дана оценка теплоощущения человека на основе срочных данных основных метеорологических параметров ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (<http://meteo.ru/>) в период с 2007 по 2017 гг. в г. Калининграде. Наиболее благоприятные теплоощущения ЕТ приходятся на летний период времени «прохладно» и даже «комфортно» («умеренно тепло»). С дальнейшим увеличением от «умеренно прохладно» до «очень холодно», это означает, что главный переход сезонов позволяет человеку достаточное время для адаптации. По индексу суровости погоды Бодмана все зимние месяцы характеризуются как «умеренно суровая» зима; по индексу охлаждения Сайпла-Пассела зимние погодные условия оцениваются как «очень холодно»; по НЭЭТ «холодный дискомфорт» наблюдается не только в холодный период года, но и захватывает еще теплый период года весну и осень, комфортные условия наступают в летние месяцы по всей территории города; в Калининграде комфортные условия БАТ наблюдаются в марте, апреле, сентябре и октябре, а дискомфортные условия для населения наблюдаются практически в течение всего года и лишь с мая по сентябрь условия характеризуются как «прохладный дискомфорт»; по РЭЭТ с сентября по апрель в Калининграде погодные условия характеризуются как «холодовой дискомфорт», а с мая же по август месяц они характеризуются как «комфортно тепло».

Сделан вывод, что комфортные условия в Калининграде устанавливаются только в летние месяцы года: май, июнь, июль; а осенне-весенне-зимний период года практически полностью дискомфортен, что объясняется повышенными значениями скорости ветра и влажностью воздуха в холодный период года.

Литература

1. *Исаев А.А.* Экологическая климатология. – М: Научный мир, 2003. – 458 с.

Изменчивость ливневых и обложных осадков на территории России по данным стационарных наблюдений

Ф. А. Козлов¹, А. В. Чернокульский²

¹ Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

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

В последнее время в мире наблюдается повышение температуры воздуха и поверхности океана, рост содержания парниковых газов в атмосфере [1, 4]. Изменение температурного и влажностного режима атмосферы может привести к изменению режима осадков.

В исследовании была оценена климатология различных видов осадков, исследована их изменчивость во временном и пространственном масштабах. Данные о ливневых, обложных и морозящих осадках были получены с помощью разработанной авторами методики. Она представляет собой анализ срочных наблюдений метеорологических станций за количеством выпавших осадков, характеристикой погоды в срок и между сроками наблюдений, морфологическим типом облачности, а также параметр качества данных. Всего в анализе участвовали 538 российских метеорологических станций с периодом измерений более 50 лет (с 1966 по 2017 гг.).

Среднеголетняя годовая сумма ливневых осадков на территории России составляет 253.8 мм. Для обложных осадков значение суммы меньше (186.9 мм). Для морозящих осадков этот показатель существенно ниже (3.5 мм). Максимальная сумма ливневых осадков в России выпадает на Северном Кавказе (примерно 1000 мм в год), максимальная сумма обложных – на юге Дальнего Востока (около 500 мм в год) [3].

Тенденция умеренных изменений общей суммы осадков на территории России за последние пятьдесят лет сопровождается существенным ростом ливневых осадков и одновременным значительным уменьшением обложных осадков. Перераспределение структуры осадков особенно сильно выражено в промежуточные сезоны (весна и осень становятся более летними с точки зрения осадков). События сильных ливневых осадков начали вносить больший вклад в общую сумму осадков. Статистически значимая тенденция составляет 1–2% в десятилетие для регионов. Полученные тенденции подчеркивают увеличение роли сильных ливневых осадков в характере общей суммы осадков [3].

В связи с полученными данными о перераспределении структуры осадков на территории России была предпринята попытка посмотреть их взаимосвязь с водостоком малых рек. Данная проблема особенно актуальна, так как интенсивность, площадь распространения, продолжительность и время выпадения осадков определяют многие особенности формирования речного стока [2]. Данная работа выполнена, в том числе, за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10032).

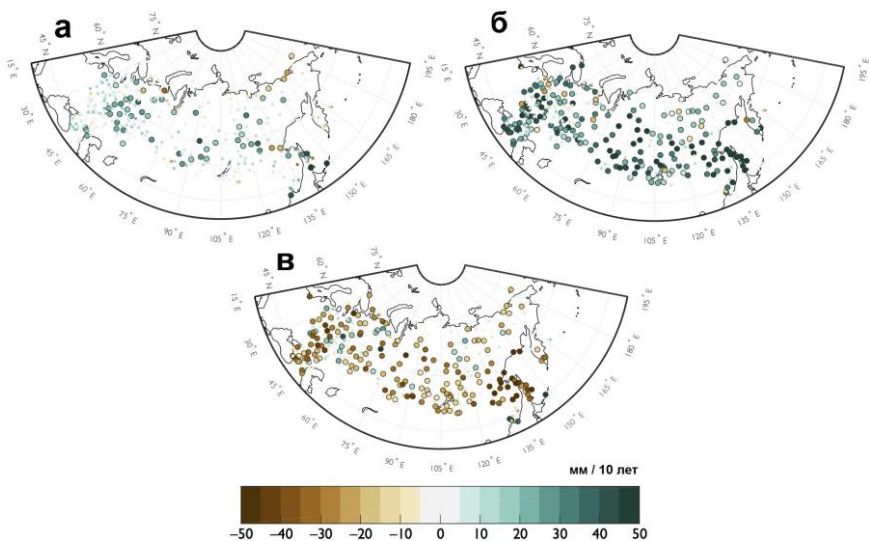


Рис. 1. Значения трендов для годовой общей суммы осадков (а), ливневых осадков (б) и обложных осадков (в).

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. // Под ред. В.М. Катцова и С.М. Семенова – М.: Росгидромет – 2014 – 1009 с.
2. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. – М.: Высшая школа, 2007, 463 с.
3. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environmental Research Letters – 2019 – 14. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aafb82/pdf>
4. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA – 2013 – 1535 pp.

Характеристики МКК на юге Западной Сибири

Т. С. Кошикова¹, К. Н. Пустовалов^{1,2}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

² Томский государственный университет, Томск

Наиболее экстремальными проявлениями конвекции являются мезо-масштабные конвективные комплексы (МКК), генерирующие многие опасные явления [1]. Согласно [2], МКК – комплекс кучево-дождевых облаков, объединённых общей наковальной, и временем жизни более 16 ч. Целью работы: оценка характеристик МКК на юге Западной Сибири.

Исходными данными послужили RGB-изображения MODIS [4] и облачные продукты второго уровня обработки MODATML2 и MYDATML2 [3], содержащие данные об оптической толщине облачности, высоте верхней границы облачности (ВГО), интегральном влагосодержании и температуре ВГО. Исследование проводилось на территории юга Западной Сибири (50–60 °с.ш., 70–90 °в.д.), за апрель-сентябрь 2010–2019 гг.

Разработана методика автоматизированного отбора случаев МКК и выделения их границ. Критериями для отбора послужили:

1. температура ВГО ≤ 200 К (-32 °С) [2];
2. площадь МКК $\geq 10^4$ км² (составляет 1/10 от предложенных в [2]);
3. оптическая толщина ≤ 30 (отделяет МКК от соседних облаков).

Всего отобрано 462 случая прохождения МКК. Далее рассчитывались и анализировались площади МКК (S), их протяжённости вдоль широты (L_{lat}) и долготы (L_{lon}), влагосодержание (Q) и высота ВГО ($H_{ВГО}$).

Таблица 1. Характеристики МКК (процентили P₅/P₅₀/P₉₅)

L_{lat} , км	L_{lon} , км	S , км ²	$H_{ВГО}$, км	Q ($\times 10^8$), кг
75/115/151	96/138/218	10300/12800/19200	9/12/16	55,9/155/502

Согласно табл.1, L_{lat} и L_{lon} в среднем составляют 115 и 138 км, и изменяются в диапазонах 75÷151 км и 96÷218 км соответственно. Медианное значение S – 12800 км², а её диапазон – 10300÷19200 км². Медиана $H_{ВГО}$ составляет 12,3 км, а диапазон $H_{ВГО}$ – 9÷16 км. Среднее Q равно $155 \cdot 10^8$ кг и изменяется в пределах $55,9 \div 502 \cdot 10^8$ кг.

Исследования поддержаны грантом Президента РФ (МК-489.2020.5).

Литература

1. Вельтицев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. – М.: МГУ, 2006. – 101 с.
2. Maddox R.A. Mesoscale convective complexes // Bull. Am. Meteorol. Soc., 1980. V. 61. – P. 1374–1387.
3. LAADS Web – URL: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>.
4. EOSDIS Worldview – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.

Применение результатов климатических моделей для оценки проекций регионального климата

С. А. Маммедов, В. А. Лобанов

Российский государственный гидрометеорологический университет, С.-Петербург

Особенность моделей климата проекта СМIP5 в том, что они позволяют воспроизвести климат осредненный как во времени в виде климатических норм, так и по пространству [1]. Поэтому модели климата не в состоянии воспроизвести естественную климатическую изменчивость и при применении сценарных расчетов к региональному климату результаты также должны быть скорректированы.

В рассматриваемой работе предлагается методика выбора наиболее эффективной модели климата для рассматриваемого региона и корректировки сценарных норм с учетом местных климатических особенностей. Методика включает четыре основных этапа:

- выбор для рассматриваемого региона наиболее эффективной климатической модели из нескольких путем сравнения наблюдаемых климатических норм и норм, рассчитанных на основе Исторического эксперимента проекта СМIP5 за совместный период до 2005 г. [2];

- определение поправки, обусловленной систематическими погрешностями модели по отношению к наблюдениям на конкретной метеорологической станции (поправка на локальный климат);

- определение поправки, обусловленной расхождением между изменением во времени по данным наблюдений на станции и изменениями по сценариям (поправка на динамику экстраполяции);

- добавление совместной поправки (на локальный климат и на экстраполяцию) в сценарные значения норм для конкретных метеостанций [2] с целью получения наиболее правдоподобных проекций локального климата.

Поправка на градиент норм температур состоит в том, что рассчитывается средний градиент между сценарными нормами за 30-летний будущий период и если градиент между нормами за 1980–2010 гг. и 2011–2040 гг. отличается от сценарного градиента более, чем на 1°C, то он корректируется на средний сценарный и сценарные нормы на столько же уменьшаются.

Средний сценарный градиент норм температуры (dT) вычислялся по формуле:

$$dT = (T_{н3} - T_{н1})/2, \quad (1)$$

где $T_{н1}$, $T_{н3}$ – нормы температур за периоды 2011–2040 гг., и 2071–2100 гг., а градиент между наблюдаемыми и сценарными нормами (dT') рассчитывался как:

$$dT' = (T_{н1} - T_{н0}), \quad (2)$$

где $T_{н0}$ – нормы температур за последний наблюдаемый период 1981–2010 гг.

И, если $dT' - dT > 1^\circ\text{C}$, то сценарные нормы уменьшались на эту разность, а если $T_{н1} - T_{н0} < 0$, т. е. сценарные нормы были меньше наблюдаемых, то градиентная поправка рассчитывалась как: $T_{н0} - T_{н1} + dT$ и на нее сценарные нормы увеличивались.

Применение предлагаемой методики реализовано на примере двух наиболее аномальных районов Азиатского континента: Якутия (аномально холодный регион) и Аравийский полуостров (аномально жаркий регион). В качестве моделей климата применялись наиболее известные модели, результаты моделирования по которым для проекта CMIP5 представлены в свободном доступе в Интернете: HadGEM, INM, MPI, BC C, IPSL, CNRM, BNU, CanESM, MIROC, MRI-ESM и разные сценарии RCP.

Получено, что для Аравийского полуострова наиболее эффективной является климатическая модель MPI. Поправки в сценарные значения климатических характеристик при их приложении к конкретным метеостанциям, в сумме достигают $5\text{--}6^\circ\text{C}$. В результате были получены наиболее обоснованные будущие нормы температур до конца 21 века и установлено, что уже современные высокие летние температуры в среднем могут вырасти еще на 2°C , а зимние – на 1°C до конца этого столетия.

Для территории Якутии в зависимости от метеостанции и сезона года наилучшими являются разные модели климата. Как правило, при применении наиболее эффективных моделей погрешности в нормах температур составляют менее $1\text{--}2^\circ\text{C}$ для теплого периода года. Зимой погрешности в нормах могут составлять и по наилучшим моделям до $4\text{--}6^\circ\text{C}$. В целом наиболее эффективной для территории республики можно признать английскую модель HadGEM2 Хэдли Центра, которая показала себя наиболее эффективной в 50% случаев.

Литература

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change). 2013. The physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley (eds). Cambridge University Press: Cambridge, p 1552.
2. http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html – Официальный сайт пятой фазы проекта по сравнению взаимосвязанных моделей Всемирной программы по изучению климата, раздел «Доступ к данным».

Макроциркуляционные процессы и ледовые характеристики Каспия

Ж. К. Наурозбаева^{1,2}, *В. А. Лобанов*²

¹ УГМИКМ РГП «Казгидромет», Алматы, Казахстан,

² Российский государственный гидрометеорологический университет, С.-Петербург

В данной работе проведен анализ временного хода форм общей циркуляции атмосферы (ОЦА), основных ледовых параметров, температуры воздуха. Сформирована база данных по температуре воздуха, толщине льда, типов ОЦА. Для типов циркуляции атмосферы было пересчитано средне-многолетнее значение, выделены эпохи. Выявлены основные связи зависимости между параметрами.

Из проведенной исследовательской работы получены следующие результаты:

- обновлены средне-многолетние значения по типам циркуляции атмосферы;

- выявлены основные тенденции во временном ходе типов ОЦА, определен год ступенчатого перехода от одного стационарного периода к другому;

- сумма отрицательных температур уменьшилась на всех гидрометеорологических станциях и постах Прикаспийского региона, но с разной интенсивностью: наибольшие изменения в восточной части и меньшие в районе Северного Кавказа, причем ступенчатое падение сумм отрицательных температур на большинстве станций, как и уменьшение максимальных толщин льда, относится к 1988 году;

- максимальная толщина льда за рассмотренный период с 1940–1950-х по 2018 г. уменьшилась во всех пунктах наблюдений и больше всего на северо-востоке (на 20–28 см) и юге (на 13–17 см), причем на юге увеличилась вероятность безледовых условий; а северо-западная часть пока остается наиболее устойчивой к климатическим изменениям;

- получено, что ступенчатое уменьшение максимальной толщины льда произошло в основном в 1988 году.

Литература

1. *Бухарицин П.И.* Исследования каспийских льдов. – Palmarium Academic Publishing, 2019. 122 С.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей, том VI. Каспийское море, вып. 1. Гидрометеорологические условия. - СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 359 с.
3. *Гирс А.А.* Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – С. 7–31.
4. *Ивкина Н.И., Наурозбаева Ж.К.* Изменение характеристик ледового режима казахстанской части Каспийского моря, в связи с изменением климата // Гидрометеорология и экология, 2015. № 2. С. 28–35.

5. Исследования льдов южных морей СССР / Под. ред. К.К. Гюль, Кан С.И., Цуриков В.Л. Изд. Наука, 1973. 58 с.
6. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии. Часть 1. (учебное пособие). – Санкт-Петербург, 2011. 144 с.
7. *Лобанов В.А., Наурызбаева Ж.К.* Климатические изменения толщины льда на северном Каспии // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 172–187.
<http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue53/>

Внутрисезонная изменчивость приповерхностной температуры в полярных и субполярных регионах России

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

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

² Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Проведено исследование особенностей функций плотности вероятности (ФПВ) распределений аномалий приповерхностных температур в переходные (осенние, весенние) сезоны середины XX и начала XXI веков. Распределения, полученные по данным суточных данных метеорологических наблюдений в различных регионах Северной Евразии с исключенным годовым ходом, характеризуются полимодальностью (чаще бимодальностью) с минимумами, лежащими в районе 0 °С. Анализ возможных причин формирования полимодальных ФПВ, проведенный с использованием стохастической модели энергетического баланса, предполагает связь между бимодальностью ФПВ и нелинейным характером зависимости альbedo и приповерхностной температуры вблизи 0 °С (температура снежной границы).

Эмпирический анализ ФПВ температурных аномалий обнаруживает изменения погодных режимов начала XXI века по сравнению с серединой XX века. Некоторые из изменений выражаются в увеличении вероятности отрицательных температур для весенних сезонов в XXI веке по сравнению с XX веком, они могут быть связаны с глобальными изменениями в атмосферной циркуляции, в частности, с интенсификацией вторжений масс холодного воздуха из Арктики в весенние сезоны.

Литература

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры на станциях России / <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных>
2. Agayan G.M., Mikhov I.I. Quasistationary autumn atmospheric regimes of the Northern Hemisphere during the period of the FGGE // *Izvestiya, Atmos. Oceanic Phys.* 1989. 25, P. 851–855.
3. Mikhov I.I. Multiple climatic regimes in transitional seasons / *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. E. Astakhova (ed.). 2017. WCRP Rep. No.12/2017, 2.09–2.10.
4. Mikhov I.I., Semenov V.A. Bimodality of the probability density functions of subseasonal variations in surface air temperature // *Izvestiya, Atmos. Oceanic Phys.* 1997. 33, P. 702–708.
5. Mikhov I.I., Petukhov V.K., Semenov V.A. Multiple intraseasonal temperature regimes modelling of trends of the Earth's climate variability characteristics // *Izvestiya, Atmos. Oceanic Phys.* 1998. 34, P. 163–171.

Влияние нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря

*Е. С. Савельева*¹, *В. В. Зуев*¹, *И. В. Боровко*^{2,3,4}, *В. Н. Крупчатников*^{2,3,4}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

³ Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск

⁴ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Исходя из естественного хода стратосферных температур в полярной области, обусловленных не только существованием вихря, но и полярной ночью, можно заключить, что зимний пик интенсивности полярного вихря и его ослабление в начале весны с появлением солнечного излучения является более термодинамически обоснованным. Над Арктикой зимне-весеннее усиление полярного вихря в большинстве случаев связано с потеплением в тропической области после крупных вулканических извержений [1]. Однако над Антарктикой полярный вихрь ежегодно усиливается в начале весны, обеспечивая условия для образования озоновой аномалии.

Усиление антарктического полярного вихря в весенний период может происходить под влиянием внеполярной стратосферы [2, 3]. На рис. 1 приведены 38-летние средние внутригодовые изменения среднеширотных значений температуры и зонального ветра, полученные по данным реанализа ERA-Interim. Красные и синие линии соответствуют максимальным и минимальным значениям во внутригодовых изменениях на каждой широте.

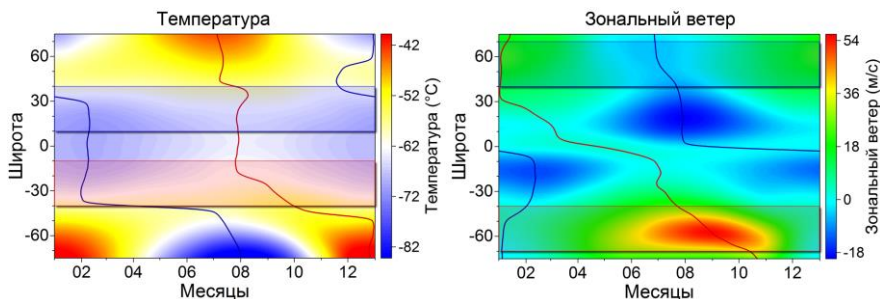


Рис. 1. Внутригодовые изменения температуры (а) и зонального ветра (б) на высоте 50 гПа в широтном диапазоне от 75°с.ш. до 75°ю.ш. в среднем за 1979–2016 гг.

На рис. 1а выделен диапазон 10°–40°ю.ш., в котором по направлению к высоким широтам наблюдается временное смещение сезонного максимума значений температуры с августа по сентябрь. Такое широтно-временное распределение максимальных значений, хорошо согласуется, с расположением сезонного максимума скорости зонального ветра в районе 40°–70°ю.ш. (рис. 1б). В свою

очередь в Северном полушарии соответствующей согласованности не наблюдается (рис. 1). Как видно из рис. 1, усиление антарктического полярного вихря в весенний период обусловлено влиянием температуры нижней субтропической стратосферы, где максимум в сентябре способствует увеличению стратосферного меридионального температурного градиента. На рис. 2 приведены диаграммы рассеяния среднемесячных значений зонального ветра на 60° ю.ш. и температурных аномалий в области $20^\circ\text{--}40^\circ$ ю.ш. за октябрь и ноябрь. Коэффициенты корреляции между рассматриваемыми параметрами в октябре и ноябре составили 0,71 и 0,82, соответственно. На рис. 2 выделены годы, в которые регистрировались наиболее крупные озоновые аномалии. Видно, что масштабное разрушение озона в эти годы происходило в результате усиления полярного вихря в условиях увеличения температуры нижней субтропической стратосферы.

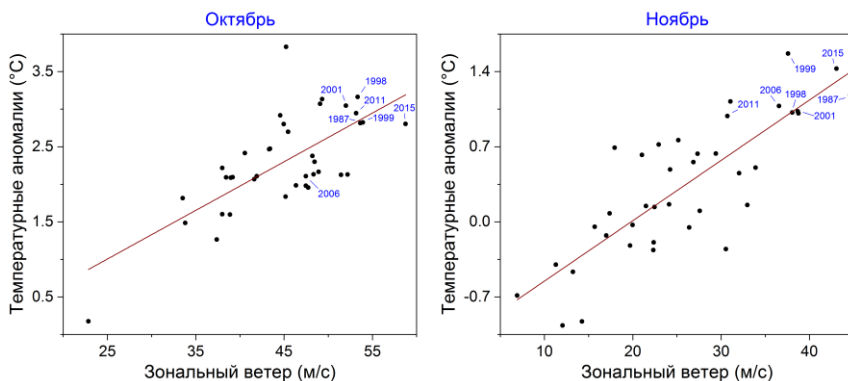


Рис. 2. Диаграммы рассеяния среднемесячных значений зонального ветра на 60° ю.ш. на высоте 50 гПа и температурных аномалий в области $20^\circ\text{--}40^\circ$ ю.ш. на высоте 70 гПа за октябрь и ноябрь с 1979 по 2016 гг.

Таким образом, показано, что устойчивость антарктического полярного вихря зимой и его ежегодное весеннее усиление обусловлены сезонным ходом температуры нижней субтропической стратосферы, где наблюдаются постепенный рост начиная с марта и максимум в сентябре. При этом увеличение температуры нижней субтропической стратосферы с октября по ноябрь приводит к усилению антарктического полярного вихря в этот период, сопровождающемуся масштабным разрушением озона.

Литература

1. Zuev V.V., Zueva N.E., Savelieva E.S. The role of the Mt. Merapi eruption in the 2011 Arctic ozone depletion // Atmos. Environ. 2017. V. 166. P. 327–333.
2. Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // Dynam. Atmos. Oceans. 2019. V. 87. P. 101097.
3. Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the strengthening of the Antarctic polar vortex during October–November periods // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 190. P. 1–5.

Глубина изотермического слоя океана и температура воздуха в Европе

Р. С. Салугаивили

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск

В настоящее Международное проектное Арго и данные на его основе, позволяют проводить более подробные исследования Мирового океана. Исследование направлено на изучение температурных колебаний в океане, изучение изменений их с глубиной. Также исследуется связь изотермического слоя и слоя перемешивания океана и колебаний температуры в Европе.

Океан является наиболее инерционной составляющей климатической системы Земли. Процессы, происходящие на границе океана и атмосферы, играют важнейшую роль в формировании глобального климата. В результате различных процессов в океане и неравномерного их изменения, с различной интенсивностью возникают горизонтальные и вертикальные градиенты, одновременно действуют силы в сторону уменьшения градиентов. Благодаря горизонтальному и вертикальному обмену происходит перемешивание, и появление перемешанного слоя.

Таким образом, верхняя часть океана характеризуется наличием вертикального однородного слоя температуры (изотермический слой) и слоя плотности (смешанный слой). Эти слои имеют почти нулевой вертикальный градиент температуры или плотности соответственно.

Глубина слоя с постоянной плотностью (смешанный слой) важный параметр, который в значительной степени влияет на колебание температуры поверхности океана (ТПО), и в свою очередь связано с изменениями потоков на границе океана и атмосферы. Верхний слой океана, тот слой, который непосредственно взаимодействует с атмосферой, определяет динамику и силу взаимодействия. Он играет огромную роль в формировании глобального климата, и регионального климата. Толщина смешанного слоя определяет теплосодержание и механическую, температурную, инерцию слоя, который непосредственно взаимодействует с атмосферой.

Исследование связи покрытия снегом Евразии осенью и аномалий динамики атмосферы последующей зимой по данным модели климата ИВМ РАН и реанализов

М. А. Тарасевич, Е. М. Володин

Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, Москва

Результаты многих исследований [1, 2], проведённых по данным климатических наблюдений и реанализов, свидетельствуют о наличии связи между площадью снега осенью в Евразии и индексом североатлантического колебания последующей зимой. Таким образом, данные об осенней площади снега в Евразии могут быть использованы для прогнозирования зимних аномалий динамики атмосферы. Эти данные можно получить не только из наблюдений, но и в результате климатического моделирования. Согласно работе [3] модели климата не очень хорошо воспроизводят наблюдаемую связь между площадью осеннего снега в Евразии и североатлантическим колебанием зимой. Целью настоящего исследования является проверка наличия данной связи в результатах моделирования преиндустриального и современного климата разработанной в ИВМ РАН моделью климата INMCM5 [4]. В качестве инструмента для обнаружения связи используется метод максимальной ковариации (МСА) [5].

Литература

1. *Cohen J., Entekhabi D.* Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, № 3. P. 345–348.
2. *Wu Q., Hu H., Zhang L.* Observed Influences of Autumn–Early Winter Eurasian Snow Cover Anomalies on the Hemispheric PNA-like Variability in Winter // *J. Climate.* 2011. V. 24 № 7. P. 2017–2023.
3. *Wegmann M., Rohrer M., Santolaria-Otín M., Lohmann G.* Eurasian autumn snow impact on winter North Atlantic Oscillation depends on cryospheric variability // *Earth System Dynamics Discussions.* 2019. P. 1–33.
4. *Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыков 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.
5. *Bretherton C.S., Smith C., Wallace J.M.* An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data // *J. Climate.* 1992. V. 5, P. 541–560.

Развитие системы долгосрочного прогнозирования на основе модели ПЛАВ в Гидрометцентре России

М. А. Толстых^{1,2}, Р. Ю. Фадеев^{1,2}, В. В. Шашкин^{1,2}, В. М. Хан²

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

² Гидрометцентр России, Москва

В качестве одного из компонентов системы долгосрочного прогноза осредненных аномалий макромасштабных характеристик атмосферы (температуры, приземного давления и др.) на срок от двух недель до четырех месяцев в Гидрометцентре России сейчас применяется глобальная модель динамики атмосферы ПЛАВ [1]. Ожидается, что до конца 2020 года коллективом разработчиков к оперативным испытаниям будет представлена усовершенствованная версия модели ПЛАВ 072L96 [2–4]. Среди многих изменений следует отметить включение явного воспроизведения динамики стратосферы и некоторых процессов в толще почвы, улучшения в описании характеристик подстилающей поверхности и ряда подсеточных процессов.

Предварительная оценка качества долгосрочного прогнозирования на основе новой версии модели ПЛАВ была выполнена на основе расчета прогнозов с заблаговременностью 4 месяца по архивным начальным данным за период с 1991 по 2010 гг. и стартовой датой прогноза – 30 октября. Показано, что переход на новую версию ПЛАВ приводит к значимому уменьшению отклонений среднемесячных полей осредненных по ансамблю прогнозов по сравнению с реанализом Era-Interim практически для всех полей прогноза. Существенно повышается успешность прогноза зимних индексов Северо-Атлантического колебания (САК) и Арктической осцилляции (АО). Корреляция прогноза индекса САК и АО на третий месяц составляет 0.45 и 0.48, соответственно.

Расчет исторических четырехмесячных прогнозов также был проведен для модели ПЛАВ-ИВМИО-CICE [5]. В совместной модели успешность прогнозов индексов САК и АО несколько выше, чем в модели атмосферы, однако, результаты пока уступают лучшим мировым моделям (например, GloSea метеослужбы Великобритании [6]).

Литература

1. Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В. Воспроизведение сезонной атмосферной циркуляции модифицированной полулагранжевой модели атмосферы // Изв. РАН, сер. ФАиО, 2010, Т. 46, № 2. С. 149–160.
2. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В. и др. Развитие глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2009–2019 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2019, № 4, С. 77–91.

3. *Фадеев Р. Ю., Толстых М.А., Володин Е.М.* Климатическая версия модели ПЛАВ: разработка и первые результаты // *Метеорология и Гидрология*, 2019, № 1, с. 22–35.
4. *Шапкин В.В., Толстых М.А., Володин Е.М.* Моделирование циркуляции стратосферы с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // *Метеорология и гидрология*, 2019, № 1, С. 5–21.
5. *Fadeev R. Yu., Ushakov K.V., Tolstykh M.A., Ibrayev R.A.* Design and development of the SLAV-INMIO-CICE coupled model for seasonal prediction and climate research // *RJNAMM*, 2018, № 6, P. 333–340.
6. *Scaife A., Arribas A., Blockley et al.* Skillful long-range prediction of European and North American winters // *Geophys. Res. Lett.*, 2014, V. 41, P. 2514–2519.

**ДИАГНОСТИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АТМОСФЕРЕ**

Лучевые плотности Вигнера и Кирквуда и их применение для анализа радиозатменных данных

М. Е. Горбунов^{1,2}, О. А. Коваль¹

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

² Гидрометцентр России, Москва

Квантовая плотность Вигнера была введена на раннем этапе развития квантовой механики. Она появилась в работах Вигнера, Дирака, Вейля и Гейзенберга [1–5], которые определяли ее через оператор плотности и перереформулировали квантовую механику на основе уравнений динамики в классическом фазовом пространстве. Впоследствии она получила применение в обработке сигналов с приложениями к оптике, акустике и анализу радиозатменных наблюдений [6–12]. В радиофизике такая плотность называется лучевой [9]. Плотность Вигнера позволяет развернуть одномерный сигнал, измеренный как функция времени, на пространственно-временную плоскость и разложить осциллирующий сигнал на квазимонохроматические компоненты, т.е. сигналы с плавно меняющимися амплитудой и мгновенной частотой. Применительно к радиозатменным данным, это свойство сделало плотность Вигнера полезной для анализа данных в многолучевых зонах. Менее известна квантовая плотность Кирквуда, которая также была введена в квантовой механике в тот же период времени, что и плотность Вигнера [13].

Плотности Вигнера и Кирквуда асимптотически стремятся к микроканоническому распределению, сосредоточенному на лучевом многообразии. Обе они являются символами оператора плотности: функция Вигнера – для симметричного (вейлевского) упорядочивания операторов координаты x и импульса (мгновенной частоты) ξ , функция Кирквуда – для упорядочивания $x\xi$. Однако, тогда как численное нахождение плотности Вигнера требует значительных затрат, вычисление плотности Кирквуда оказывается исключительно простым и требует всего одного преобразования Фурье.

Тем не менее применение плотности Кирквуда не столь очевидно, как плотности Вигнера. В отличие от плотности Вигнера, чья амплитуда непосредственно визуализирует лучевое многообразие, плотность Кирквуда основана исключительно на фазовых соотношениях. В нашей работе мы исследуем применение плотности Кирквуда для анализа радиозатменных данных. Мы приводим примеры обработки реальных наблюдений, сравниваем результаты вычисления обеих плотностей и обсуждаем возможные преимущества плотности Кирквуда.

Если задан 1-мерный сигнал, или волновая функция $\psi(x)$, то плотности Вигнера $\rho^W(x, \xi)$ и Кирквуда $\rho^{K\xi}(x, \xi)$ определяются следующим образом.

$$\rho^w(x, \xi) = \frac{k}{2\pi} \int \psi\left(x - \frac{s}{2}\right) \bar{\psi}\left(x + \frac{s}{2}\right) \exp(iks\xi) ds, \quad (1)$$

$$\rho^{x\xi}(x, \xi) = \frac{k}{2\pi} \psi(x) \int \bar{\psi}\left(x + \frac{s}{2}\right) \exp(iks\xi) ds.$$

Между этими функциями существует соотношение типа свертки:

$$\rho^w(x, \xi) = \rho^{x\xi}(x, \xi) * \frac{k}{\pi} \exp(2ik\xi), \quad (2)$$

пользуясь которым, мы строим алгоритм быстрого нахождения функции Вигнера, сглаженной по масштабу порядка размера квантовой ячейки.

Данная работа была выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-05-00189 А).

Литература

1. *Dirac P.A.M.* Note on exchange phenomena in the Thomas atom // Proc. Camb. Phil. Soc. 1930. V. 26. P 376–395.
2. *Weyl H.* The Theory of Groups and Quantum Mechanics. – New York, Dover, 1931. – 422 p.
3. *Heisenberg W.* Über die inkohärente Streuung von Röntgenstrahlen // Physik. Zeitschr. 1931. V. 32. P. 737–740.
4. *Wigner E.P.* On the quantum correction for thermodynamic equilibrium // Phys. Rev. 1932. V. 40. June. P. 749–759.
5. *Татарский В.И.* Вигнеровское представление квантовой механики. // УФН, 1983, V. 139, № 4. С. 587–619.
6. *Ville J.* Théorie et Applications de la Notion de Signal Analytique // Cables et Transmission. 1948. V. 2A. P. 61–74.
7. *Cohen L.* Time-Frequency Distribution – A Review // Proceedings of the IEEE. 1989. V. 77, No. 7. P. 941–981.
8. *Boashash B.* Time-Frequency Signal Analysis and Processing – A Comprehensive Reference. – Amsterdam: Elsevier, 2003. – 744 p.
9. *Кляцкин В.И.* Стохастические уравнения. Теория и ее приложения в акустике, гидродинамике и радиофизике [в 2-х томах]. – Москва: Физматлит, 2008. – 317 с., 344 с.
10. *Вировлянский А.Л.* Лучевая теория дальнего распространения звука в океане. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН. 2006. – 164 с.
11. *Горбунов М.Е.* Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. – Москва: ГЕОС. 2019. – 300 с.
12. *Alonso M.A.* Wigner functions in optics: describing beams as ray bundles and pulses as particle ensembles: Doc. ID 148673 / The Institute of Optics, University of Rochester, Rochester, New York 14627, USA, 2011. – 272 p.
13. *Kirkwood J.G.* Quantum statistics of almost classical assemblies // Phys. Rev. 1933 V. 44. July. P. 31–37.

Трехмерное моделирование глобальных процессов в озоносфере и нижней ионосфере. Роль солнечной активности

А. А. Криволуцкий

Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) Росгидромета, Долгопрудный

Введение. Численное моделирование фотохимических процессов в атмосфере Земли прошло довольно долгий путь от простых (но важных) моделей, реализующих только кислородный цикл (цикл Чепмена [1]), до сложных глобальных трехмерных моделей, в том числе отечественных [2, 3, 4]. В этом случае учитываются сотни фотохимических реакций (включая ионно-нейтральные реакции, а также процессы ионизации). Однако, как показал опыт, даже самые полные схемы фотохимических процессов не позволяют получить правильного глобального распределения химически активной примеси (например, озона). Необходимо правильно описать пространственный перенос этой примеси. В настоящее время вся используемая при создании глобальных моделей совокупность методов и технологий позволяет воспроизводить трехмерную картину температурного режима, циркуляции и малых нейтральных и заряженных составляющих. Ниже приводятся краткие описания трех глобальных моделей, созданных в Лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО.

Модель CHARM [2] (Chemical Atmospheric Research Model) охватывает диапазон высот от поверхности Земли до высоты 90 км, и имеет следующее пространственное расширение: по высоте – 2 км, по широте 50 км, по долготе 100 км. Рассчитывается 50 компонент, участвующих в 150 фотохимических реакциях. Шаг интегрирования модели по времени составляет 5 минут. Использован численный метод «химических семейств» [5].

Модель CHARM-I [3] (Chemical Atmospheric Research Model with Ions) является развитием модели CHARM (с тем же разрешением), но с усложненной фотохимией, где учтена ионная химия области D, а также взаимодействие ионных и нейтральных составляющих. Учтены ионизирующие факторы: поток Лайман-альфа, Галактические космические лучи и др.

Модель ARM [4] (Atmospheric Research Model) является моделью общей циркуляции, нижняя граница которой расположена на высоте 1 км, а верхняя на высоте 135 км. Модель позволяет рассчитать глобальные поля температуры и ветра, которые необходимы для учета процессов переноса в фотохимических моделях.

Роль солнечной активности. Потоки УФ и корпускулярной радиации (последние важны в полярных областях) модулируются солнечным 11-летним циклом, что приводит в свою очередь к вариациям температуры, ветра, а так-

же химического состава (нейтральных и заряженных компонент). Обзор результатов в этой области представлен в монографии [6].

Заключение. Созданный комплекс глобальных численных моделей позволяет не только решать геофизические задачи фундаментального характера, но и реализовать отечественную систему мониторинга на основе разработанных численных моделей, на вход которых подаются потоки солнечной радиации. Основы такой системы будут созданы в рамках проекта АТМОС плана работ 2020–2024 гг. Росгидромета.

Литература

1. *Chapman, S.* The absorption and dissociation of ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating Earth // Proc. Phys. Soc. 1931. V. 43. P. 26–45.
2. *Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Репнев А.И., Банин М.В.* Трехмерная глобальная фотохимическая модель SHARM. Учет вклада солнечной активности. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55, № 1, с. 64–93
3. *Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю.* Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель SHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55, № 4, с. 483–503.
4. *Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Вьюшкова Т.Ю., Репнев А.И., Ключникова А.В.* Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах 0–135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. том 55, №6.
5. *Turco R.P., Whitten R.C.* A comparison of several computational techniques for solving some common aeronomic problems // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. N 22. P. 317–319.
6. *Криволицкий А.А., Репнев А.И.* Воздействие космических факторов на атмосферу Земли. М.: - ГЕОС, 2009. – 384 с.

Восстановление распределений малых примесей мезосферы – нижней термосферы по данным спутникового зондирования SABER/TIMED

М. Ю. Куликов, М. В. Беликович, А. М. Фейгин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Начиная с 2002, успешно продолжается миссия прибора SABER на спутнике TIMED, так что к настоящему моменту накоплены значительные массивы непрерывных, одновременно измеренных профилей температуры, давления, концентраций озона и паров воды, суммарного ИК излучения переходов OH^* (9–7) и (8–6) (2 мкм), суммарного ИК излучения переходов OH^* (5–3) и (4–2) (1.6 мкм) и некоторых других характеристик мезосферы – нижней термосферы (МНТ) в диапазоне широт (82°S , 82°N). Эти данные недавно стали доступны для всеобщего использования, что заметно усилило интерес к исследованию атмосферных свечений, обуславливаемых возбужденными состояниями OH , O и O_2 , химического состава и динамики МНТ. В частности, в последние 2–3 года стартовала кампания по существенной ревизии моделей этих свечений и методов восстановления пространственно-временной эволюции плохо измеряемых характеристик МНТ по данным различных спутниковых измерений, так что уже сейчас можно наблюдать заметный рост числа публикаций, посвященных этим вопросам.

В данной лекции представлен обзор методов и подходов для восстановления дневных и ночных распределений неизмеряемых компонент семейств NO_x (N , OH , NO_2) и O_x (O , $\text{O}(^1\text{D})$) по данным SABER/TIMED.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-05-00471.

Средняя и верхняя атмосфера: проблемы, тренды, частицы

О. С. Угольников

Институт космических исследований РАН, Москва

Быстрые изменения состава приземных слоев атмосферы, в частности, рост содержания парниковых газов, приводят к различным процессам и в более высоких слоях – стратосфере и мезосфере. Тепловой эффект от парниковых газов выше 10–15 км меняет знак, и в настоящее время в этих слоях регистрируются негативные температурные тренды, которые по модулю могут существенно превышать темп роста приземной температуры.

Негативный тренд сильнее всего проявляет себя в наиболее холодных слоях, где температура близка к порогу замерзания водяного пара: зимней стратосфере и летней мезосфере высоких широт. Это может проявляться в увеличении частоты появления полярных стратосферных и мезосферных облаков и изменении микрофизических свойств их частиц. Данный факт особенно важен еще и тем, что на поверхности частиц стратосферных облаков образуются свободные атомы и молекулы, разрушающие озон.

Первое десятилетие XXI века проявило также тенденцию к росту содержания сульфатного аэрозоля в стратосфере, который мог иметь как вулканическое, так и антропогенное происхождение.

Основной настоящей работы являются систематические измерения интенсивности и поляризации фона рассеянной радиации в период сумерек с целью восстановления микрофизических свойств аэрозоля и облачных частиц в стратосфере и мезосфере. Измерения проводятся на протяжении 10 лет, что, в частности, позволило подтвердить прекращение роста уровня стратосферного аэрозоля в 2010-е годы, что указывает на принципиальность вклада вулканов, активность которых во втором десятилетии XXI века уменьшилась.

Поляризационные измерения размера частиц мезосферных (серебристых) облаков показывает их связь не с самим похолоданием мезопаузы, которого в последние годы не наблюдается, а со смещением летней мезопаузы на меньшие высоты, то есть с похолоданием более влажных слоев мезосферы на высотах 75–80 км, где могут образовываться сравнительно крупные частицы льда.

Зима 2019–2020 годов стала аномально теплой в восточной Европе, но при этом температуры в стратосфере были очень низкими, что привело к частому появлению стратосферных облаков. Впервые была измерена поляризация света, рассеянного их частицами, что также обсуждается в работе.

Диагностика наличия глубокой конвекции с использованием спутниковых данных

А. Ю. Баданов^{1,2}, *К. Г. Рубинштейн*^{3,4}, *Ю. И. Юсупов*²

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

² НПЦ «МЭП Мейкер», Москва

³ Гидрометцентр России, Москва

⁴ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Обсуждается способ диагностики глубокой влажной конвекции с помощью информации, получаемой со спутников.

Для решения задачи диагностики степени развития конвективного процесса используются не только яркостные температуры ИК-излучения на длинах волн 10,8 мкм ($T_{ик}$), 6,2 мкм ($T_{вп}$), получаемые с использованием спутниковых данных, но также результаты расчётов гидродинамических моделей – температура тропопаузы ($T_{тп}$), получаемая с использованием моделей Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [1–3].

В рассмотренном методе используют оценки трёх параметров конвективного процесса: температура верхнего слоя облаков ($T_{ик}$), разность температур водяного пара ($T_{вп}$) и верхнего слоя облаков ($T_{ик}$), разность температур верхнего слоя облаков ($T_{ик}$) и температуры тропопаузы ($T_{тп}$).

Область слабой активности характеризуется яркостной температурой ИК 10,8 мкм менее 233 К ($T_{ик} < 233$ К), а также положительной разницей яркостных температур водяного пара канала 6,2 мкм и канала 10,8 мкм ($T_{вп} - T_{ик} > 0$). Область сильной активности характеризуется наличием двух предыдущих параметров, а также отрицательными значения $T_{вп} - T_{ик}$ ($T_{вп} - T_{ик} < -2$ К).

При совместном использовании базы данных измерений метеорологических радаров, архива погодных наблюдений и результатов работы представленного алгоритма, показывается соответствие радарных измерений, расчётов с использованием рассмотренного алгоритма и мест фиксации метеорологических явлений.

По результатам предварительного анализа, вероятность ложных тревог составляет от 4% до 8%, вероятность корректно определённого события — 85%–87% в зависимости от используемого параметра. Вероятность пропуска события составляет 13%, что обусловлено малостью линейных размеров явления по сравнению с разрешением спутника.

Литература

1. *Carlos Pinto Da Silva Neto et al.* A method for convective storm detection using satellite data // Atmosfera. 2016. V. 29(4). P. 343–358.
2. *Donovan M.F. et al.* The identification and verification of hazardous convective cells over oceans using visible and infrared satellite observations // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2008. V. 47(1). P. 164–184.
3. *Amorati R. et al.* IR-based satellite and radar rainfall estimates of convective storms over northern Italy // Meteorol. Appl. 2000. V. 7, P. 1–18.

О возможности уточнения параметров модели свечения возбуждённого гидроксила по большим массивам спутниковых данных

М. В. Беликович, М. Ю. Куликов, А. М. Фейгин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Известно, что наблюдение свечения OH^* широко используется, в частности, для непрямых измерений важнейших компонент мезосферы – нижней термосферы, таких как O и H . Краеугольным камнем в процедуре их определения являются коэффициенты модели возбуждённого гидроксила, определяющие степени заселения возбужденных уровней, их радиационные времена жизни, скорости релаксации/гашения всех возможных (как одноквантовых, так и мультиквантовых) переходов вниз в столкновениях/реакциях с O_2 , N_2 и O .

В настоящее время в научном сообществе ведётся оживлённая дискуссия по поводу этих коэффициентов. Исследователи меняют наборы их значений, опираясь на новые лабораторные измерения, которые далеко не всегда можно однозначно интерпретировать, пытаются улучшить рассогласование с имеющимися моделями мезосферной химии или уменьшить систематическую разницу между данными, полученными посредством разных спутниковых приборов и т.д. Каждый новый набор коэффициентов порождает собой новую базу данных восстановления.

В данном докладе анализируется возможность определения величин коэффициентов модели свечения OH^* путём анализа большого массива спутниковых данных с привлечением алгебраических связей, следующих из условия фотохимического равновесия некоторых компонент мезосферной фотохимии. Отметим, что эти связи сами по себе зависят от констант реакций невозбужденных компонент, тем не менее, предполагается, что они известны с заметно меньшей неопределённостью, чем искомые параметры модели свечения OH^* . В качестве первого шага производится оценка сверху: аналитическими методами оценивается, какую информацию можно извлечь из сколь угодно большого массива данных при отсутствии ошибки измерений. Далее предлагается метод для обработки конечного массива данных измерений с шумом. Он основан на вероятностном (Байесовом) подходе к решению обратных задач. Обсуждается возможность учёта конечной точности алгебраической связи, следующей из условия фотохимического равновесия. Рассматриваются возможные приёмы численной реализации данного метода.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-05-00471.

Турбулентная структура, стратификация и ветровой режим нижней тропосферы в Москве

А. П. Бойко¹, М. А. Локощенко^{1,2}, Л. В. Фоменко³

¹ Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

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

³ Центральная Аэрологическая Обсерватория. Долгопрудный

Многолетние данные радиозондирования и акустического зондирования позволяют подробно исследовать ветровой режим, температурную стратификацию и турбулентную структуру нижней тропосферы. Источниками таких данных в Московском регионе являются зондирование в Метеорологической обсерватории МГУ двумя акустическими локаторами (содарми) и радиозондирование на ближайшей аэрологической станции Долгопрудный. Результаты важны для уточнения краткосрочных прогнозов погоды, экологического мониторинга и ряда других задач.

Для исследования динамики турбулентности в нижнем километровом слое воздуха были рассчитаны профили градиентного числа Ричардсона Ri [1] при устойчивой стратификации. В расчётах использованы профили температуры воздуха T и скорости ветра V с шагом по высоте 100 м по результатам ночного радиозондирования (в 02.30) за 2016–2017 гг.; всего – 689 профилей за два года. По виду высотно-временной развёртки эхосигнала содара «ЭХО-1» в МГУ в эти часы определялась температурная стратификация, включая случаи приземных инверсий. Проблема устремления Ri к бесконечности при отсутствии сдвига ветра решалась условным увеличением V на +0,1 м/с на верхней границе каждого расчётного интервала, в котором $\partial V/\partial z = 0$. Среднегодовые профили Ri отражают общий рост значений с высотой, однако эта функция не является монотонной: на высотах 300–400 м проявляется локальный максимум, предположительно связанный с вершиной приземных инверсий. Выявлены заметные сезонные различия: в нижнем 200-метровом слое воздуха средние значения Ri весной и летом больше, чем осенью и зимой, вследствие, видимо, более интенсивных весной и летом приземных инверсий (рис.1). Выше 200 м это соотношение обратное; вероятная причина – более мощные приземные инверсии осенью и зимой.

Рассчитанные профили Ri в Долгопрудном были сопоставлены с содарными данными в МГУ о вершине слоя с сильным эхо-сигналом, отражающим развитие динамической турбулентности в толще приземной инверсии. Условия Долгопрудного (ближнего пригорода столицы) и района МГУ с неплотной застройкой можно считать близкими, несмотря на их значительное удаление (24 км). Результатом сравнений явился анализ реальных критических значений числа $Ri_{кр}$. Как известно, экспериментальные оценки $Ri_{кр}$ в литературе сильно разнятся [2]. Наши результаты показали, что вплоть до

величин порядка нескольких десятков Ri (от 10 до 40) мелкомасштабная турбулентность еще существует. Пороговое значение числа Ричардсона, при котором эхо-сигнал в данных содара уже отсутствует, составляет около 100.

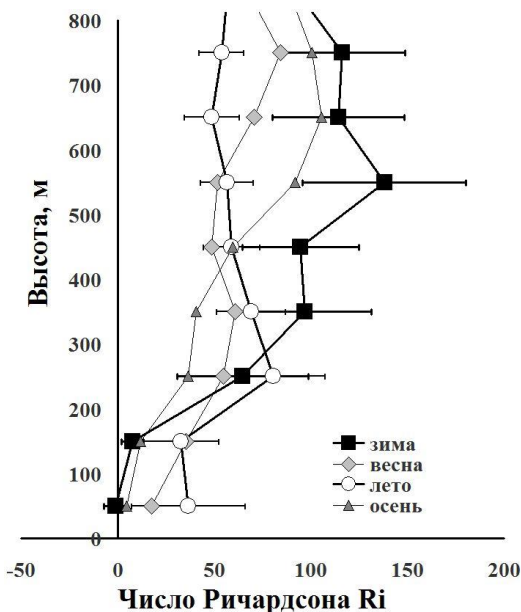


Рис. 1. Средние профили числа Ричардсона в разные сезоны по данным ночного радиозондирования в Долгопрудном в 2016–2017 гг. Доверительные интервалы для зимы и лета построены с уровнем значимости 5%.

Годовой ход вертикального градиента T ночью в приземном слое отмечен наибольшими по абсолютной величине значениями с апреля по август. Причина этого – более частые и более сильные приземные инверсии весной и летом в условиях преобладающей ясной и тихой погоды. В годовом ходе сдвига ветра очевидных закономерностей не выявлено.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 16–17–10275.

Литература

1. *Richardson L.F.* The supply of energy from and to atmospheric eddies // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1920. V. 97, No. 686. P. 354–373.
2. *Зилитинкевич С.С.* Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои // М.: Физматлит, 2013. – 248 с.

Уточнение эмиссий ЕМЕР для расчетов ХТМ CHIMERE на примере г. Москвы

Д. В. Борисов, И. Ю. Шалыгина, И. Н. Кузнецова, М. Н. Нахаев
ФГБУ «Гидрометцентр России»

В Гидрометцентре России в квази-оперативном режиме работает технология расчета концентраций загрязняющих примесей на основе модели атмосферы COSMO-Ru и химической транспортной модели (далее ХТМ) CHIMERE для московского региона. Расчеты ведутся на сетках с разрешением 11 км и 2 км. Регулярный мониторинг качества модельных расчетов на основе данных АСКЗА в Москве позволил установить, что ошибки модельных расчетов связаны в том числе с неточностью задания данных об эмиссиях [1]. Поэтому коррекция эмиссий с целью приближения их к реальным выбросам необходима для улучшения качества прогнозов концентраций загрязняющих примесей в воздухе московского региона.

Для расчетов ХТМ CHIMERE, ввиду отсутствия отечественной базы данных о выбросах в формате, пригодном для моделирования, используется зарубежная открытая база данных (Далее БД) ЕМЕР (European Monitoring and Evaluation Programme).

В межгодовой динамике данных кадастра ЕМЕР 2008 и 2013 годов по PM_{10} выявлено увеличение вклада источника SNAP4 (производственные процессы) в выбросы $PM_{2.5}$ (на 22%) и PM_{coarse} (на 26%). Согласно данным ЕМЕР 2013 года, выбросы от SNAP4 составляют более 40% от общего объема выбросов этих веществ. Такая тенденция не соответствует изменчивости выбросов, описанной в официальных докладах. Результаты сравнения расчетных и наблюдаемых значений показали завышение модельных концентраций. Был проведен эксперимент по замене данные о выбросах $PM_{2.5}$ и PM_{coarse} от SNAP4 2013 года на данные 2008 года. Экспериментальные расчеты показали, что снижение объема выбросов по SNAP4 положительно сказалось на качестве модельных расчетов.

В ходе предыдущих исследований [2] была выявлена и скорректирована территориальная неоднородность поля эмиссий CO , NO_x и $NMVOC$ от автотранспорта. В ходе представляемого исследования был выявлен ярко выраженный максимум эмиссий PM_{10} на юге г. Москвы и заниженные значения на севере. Была проведена процедура выравнивания значений выбросов PM_{10} по всей территории города. С помощью проведенной процедуры были получены более однородные по территории города поля концентраций PM_{10} (рисунок 1).

Ранее проведена коррекция сезонного хода выбросов CO , NO_x и $NMVOC$ от автотранспорта на территории Москвы с использованием данных компании Яндекс [2]. На основе данных о выбросах предприятий энер-

гетической промышленности, был рассчитан средний за 2 года (2018 и 2019 гг.) сезонный ход выбросов CO и NO_x. Проведено сравнение сезонного хода реальных выбросов и заложенного в модели сезонного хода эмиссий по этому источнику. Сравнение показало согласованность этих двух ходов.

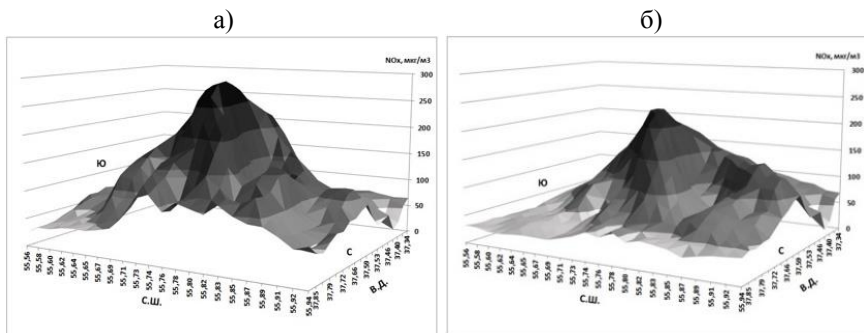


Рис. 1. Расчетное поле концентраций PM10 на сетке 2×2 км, а) – до, б) – после коррекции, 6 июня 2019 г.

В дальнейшем ходе научной работы планируется анализ официальной статистики о выбросах на территории Москвы и коррекция данных ЕМЕР с использованием вышеописанных способов, а также поиск новых методов коррекции.

Литература

1. Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю. и др. Прогнозирование концентраций загрязняющих веществ в атмосфере с применением химической транспортной модели CHIMERE и модели COSMO-Ru7. //Труды «Гидрометцентра России». 2015. Выпуск 357. С. 146–164.
2. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей. //Труды «Гидрометцентра России». 2019. Выпуск 374. С. 203–218.

Реакция бензола с атомами галогенов

Н. Д. Волков, Д. Р. Нигматуллин, Е. А. Сайгина, Е. С. Васильев, И. И. Морозов
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
Москва

Бензол широко используется в промышленности, в органическом синтезе, в аналитической химии, как растворитель многих органических и некоторых неорганических веществ и в других областях. Реакции токсичного бензола изучались в основном в жидкой фазе. Только несколько исследованных реакций бензола были выполнены в газовой фазе, которые были проведены в различных противоречивых экспериментах.

Методом конкурирующих реакций с применением молекулярно-пучковой масс-спектрометрии была изучена кинетика реакций атомарного фтора с бензолом. Была определена константа скорости реакции при комнатной температуре. Ранее нами была определена константа скорости бензола, с использованием в качестве конкурирующих веществ монохлоруксусную кислоту и метан. В настоящей работе для исключения влияния побочных реакций на определение константы скорости реакции были дополнительно проведены исследования. В качестве конкурирующих веществ были: трихлоруксусная кислота, трифторуксусная кислота и циклогексан, для которых константы скорости реакций известны достаточно большой достоверностью.

Была определена константа скорости реакции бензола с атомарным фтором, которая составила $k = (1.67 \pm 0.29) \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ молекул}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Установлены основные продукты этой реакции: фенил и фторбензол.

Таблица 1. Константы скорости реакции

Вещество	Константа скорости реакции, $\times 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ молекул}^{-1} \text{ с}^{-1}$
Трихлоруксусная кислота	2.07 ± 0.26
Трифторуксусная кислота	1.75 ± 0.26
Циклогексан	1.19 ± 0.36

This work was supported by the RFBR grant No. 19-05-50076 (MIKROMIR). Modification of the experimental setup was performed as part of the state task of Russia (V.45.12, 0082-2014-0012, № AAAA-A17-117040310008-5).

Литература

1. Волков Н.Д., Морозов И.И., Васильев Е.С. Кинетика реакции атомов фтора с пиридином // Химическая безопасность, 2018, 2, №2, P. 151–157.
2. Smith D.J., Setser D.W., Kim K.C. et al. // J. Phys. Chem. 1977. V. 81. №. 9. P. 898.
3. Ebrecht J., Hack W., Wagner H.Gg. // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1989. V. 93. №. 5. P. 619.

4. Гурвич Л.В., Караченцев Г.В., Кондратьев В.Н., Лебедев Ю.А., Медведев В.А., Потапов В.К., Ходеев Ю.С. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М.: Наука, 1974. С. 351.
5. Vasiliev E. S., Morozov I. I., Karpov G. V. Rate constant for the reaction of F-atoms with trichloroacetic acid, *Int. J. Chem. Kinet.*, 2019, 51(12), P. 909–917.

Температурный режим лесопарков Москвы

Е. А. Енукова¹, М. А. Локощенко^{1,2}

¹ Государственный университет «Дубна», Дубна, Московская область

² Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

Разные типы подстилающей поверхности создают в своем окружении различия в температурном режиме – так, городским лесопаркам присуще уменьшение температуры как воздуха, так и поверхности по сравнению с окружающей городской территорией. Основным показателем охлаждающего эффекта лесопарка является интенсивность локального «острова холода»: $\Delta T = T_1 - T_2$, где T_1 – средняя температура внутри парка; T_2 – средняя температура остальной части города. Основным многолетним источником регулярных данных о температурном режиме лесов и парков служат радиометрические измерения с борта спутников Aqua и Terra, имеющие высокое пространственное разрешение (1 км) и точность $\pm 1^\circ\text{C}$. Заметим, что при значительной сомкнутости крон измеряется температура их поверхности, а в разреженных зелёных зонах – температура как самих крон деревьев, так и поверхности в просветах между ними.

В работе были использованы ежедневные снимки обоих спутников за период 2008–2018 гг. и созданный авторами векторный слой 28 городских лесов и парков Москвы площадью не менее $0,5 \text{ км}^2$. Помимо температуры, получены данные о величине вегетационного индекса V и индекса листовой поверхности L для каждой отдельной «зелёной» ячейки размером $1 \times 1 \text{ км}$. Сам же город как внешняя область сравнения определён в своих традиционных границах до 2011 гг.

В ходе работы была рассчитана средняя за 2008–2018 гг. интенсивность всех принятых к анализу парковых зон. Она составила $-1,3^\circ\text{C}$. Ее значение изменялось от случая к случаю в пределах от $-4,4$ до $+0,5^\circ\text{C}$.

Отдельный анализ каждого лесопарка с расчётами значений V и L проведён за 2016–2018 гг. по выборке из 185 снимков. Были выявлены зависимости между интенсивностью локальных «островов холода» в отдельных парках ΔT и их площадью S , а также ΔT и индексом листовой поверхности L внутри них (рис. 1). Обе связи статистически значимые с коэффициентом корреляции $-0,47$ для ΔT и L и корреляционным отношением $0,62$ для ΔT и S ; в последнем случае связь довольно тесная. Следует отметить, что для 8 из 28 парков расчет листового индекса невозможен, так как в используемом программном продукте NASA их территории отнесены к городскому типу поверхности. Наиболее сильный «поверхностный остров холода» создает уникальный природный лес Лосиный остров площадью $38,8 \text{ км}^2$ в черте города. Три самые маленькие по площади зелёные зоны из 28 рассмотренных (Кузьминское и Ваганьковское кладбища, а также Нескучный сад) оказались в среднем, напротив, теплее, чем окружающая их городская террито-

рия: ΔT составила для них от +0,4 до +0,9°C. Причинами обратного термического эффекта, видимо, служат проникающее воздействие окружающей урбанизированной территории, а также особенности подстилающей поверхности под разреженными кронами деревьев (мощёные тропинки, каменные надгробья, обустроенные зоны отдыха и др.). Исходя из этого, можно сделать следующие выводы:

1. Чем больше парк по площади, тем более сильный охлаждающий эффект он создает.

2. Чем плотнее кроны деревьев внутри лесопарковой зоны, тем больше по абсолютному значению интенсивность локального «острова холода».

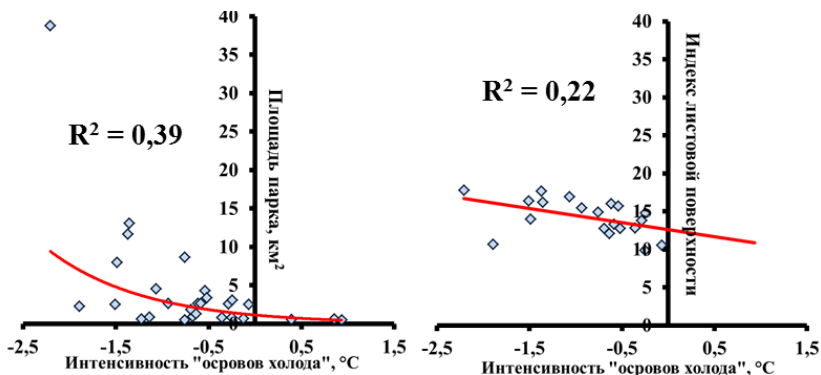


Рис. 1. Графики зависимостей интенсивности «островов холода» в парках: верхний – от площади парка; нижний – от значения листового индекса (LAI)

Авторы благодарят М. В. Зимина и других сотрудников ИТЦ «СКАНЭКС» за помощь с программным обеспечением и консультации.

Литература

1. Локощенко М.А., Енукова Е.А. Остров тепла в Москве по данным спутников / Метеорология и гидрология. 2020, в печати.

Содарные исследования внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое и их влияния на обменные процессы

*Д. В. Зайцева¹, М. А. Каллистратова¹, В. С. Люлюкин¹, Р. Д. Кузнецов^{1,2},
Д. Д. Кузнецов¹*

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

² Финский метеорологический институт, Хельсинки

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) часто регистрируются в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (УПС). ВГВ можно разделить на типы по механизму генерации: гравитационно-сдвиговые волны (ГСВ) и бегущие волны плавучести (БВП). Считается, что ВГВ оказывают влияние на турбулентные характеристики в УПС. К настоящему времени этот тезис подтверждается результатами численных, лабораторных и натурных экспериментов (напр. [1]). И всё же до сих пор нет общепринятого мнения о степени влияния ВП и ГСВ на интенсивность турбулентности и на обменные процессы в УПС.

Эта работа является продолжением [2], в которой были представлены примеры изменений турбулентных характеристик при прохождении волн разных типов над однородной степной местностью. Мы скорректировали методику расчёта, а также проанализировали эпизоды волновой активности, наблюдавшиеся в пригородной местности в Московской области.

Звенигородская научная станция (ЗНС) находится в 50 км к западу от Москвы (55°42' N, 36°47' E) в лесистой сельской местности. ЗНС оборудована доплеровским содаром [3]. Турбулентные характеристики были рассчитаны по данным сверхзвукового термоанемометра (соника), расположенного на высоте 56 метров. Идентификация эпизодов волновой активности и определение типа волны осуществлялись путём визуального анализа содарных эхограмм.

ГСВ и БВП наблюдаются на ЗНС в среднем в 30% и 3% дней соответственно. Однако, частота появляемости волн меняется от месяца к месяцу в пределах 10–70% для ВКГ и 0–15% для БВП. На рис. 1 (а–г) представлен пример поведения потока импульса и ТКЕ для ночи, в которую наблюдался эпизод ГСВ типа валов Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) в форме наклонных полос. Цуг волн, ясно видимый на содарных эхограммах, не оказал значительного влияния на турбулентные характеристики. На рис.1 (д–е) представлен пример поведения потока импульса и ТКЕ для ночи, в которую наблюдался эпизод БВП. Прохождению БВП сопутствовало уменьшение термической устойчивости и всплески турбулентности.

Регистрируемые нами при помощи содара цуги ВКГ в форме наклонных полос чаще всего имеют нижнюю границу выше расположения соника. Су-

для по всему, такие эпизоды не оказывают такого заметного влияния на рассчитываемые по данным зоника ТКЕ и поток импульса, как БВП.

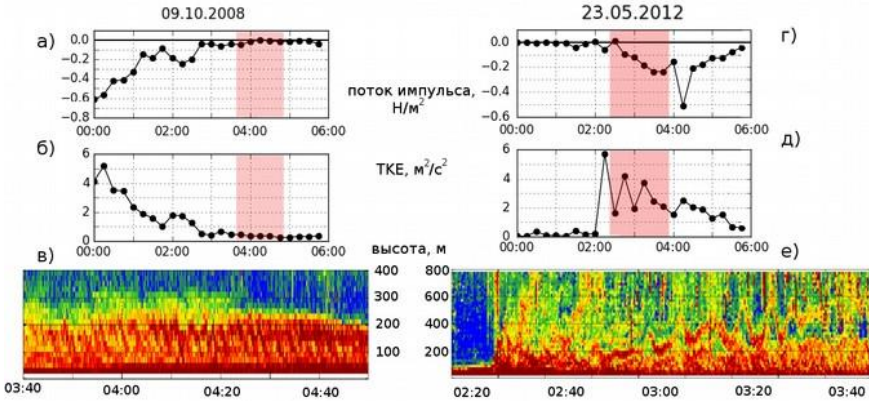


Рис 1. Типичные примеры изменений потока импульса и ТКЕ для двух ночей с волновой активностью типа ВКГ (а-в) и БВП (г-е). (а) и (г) поток импульса, H/m^2 ; (б) и (д) ТКЕ, m^2/s^2 ; (в) и (е) содарные эхограммы с четкими эпизодами ВКГ и БВП соответственно. Промежутки времени, показанные на эхограммах (в) и (е) закрашены на панелях (а), (б), (г) и (д).

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-01008).

Литература

1. Sun J., Nappo C.J., Mahrt L. et al. Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer // Rev. Geophys. 2015. V. 53. P. 956–993.
2. Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д. Воздействие внутренних гравитационных волн на флуктуации метеорологических параметров в атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54 № 2, С. 173–181.
3. Kouznetsov R.D. The multi-frequency sodar with high temporal resolution // Meteorologische Zeitschrift. 2009. V. 18, № 2, P. 169–173.

Применение химико-транспортной модели SILAM для изучения состава приземного слоя атмосферы в Москве

Н. А. Пономарёв^{1,2}, Н. Ф. Еланский², В. П. Юшков¹, В. И. Захаров^{1,2}

¹ Физический факультет МУЕ имени М.В. Ломоносова, Москва

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

Численное моделирование содержания атмосферных загрязняющих веществ, выбрасываемых источниками разного типа в крупных мегаполисах все еще остается сложной задачей, поскольку нам лишь приблизительно известны как характеристики источников эмиссий, так и характеристики турбулентного переноса, особенно в сильно неоднородной городской среде. Поэтому особенную значимость в данной работе сыграло наличие большого объема данных о содержании загрязняющих примесей: CO, NO, NO₂, O₃ играющих первостепенную роль при описании качества и состава воздуха в городской атмосфере. Это стало возможно благодаря работе сети станций «МосЭкоМониторинг» (<http://mosecom.ru/>), начиная с 2000-ых годов и включающей в себя на сегодняшний день более 30 наблюдательных пунктов. Достаточно плотное покрытие территории Московского мегаполиса станциями, а также наличие нескольких загородных станций (см. расположение станций: <http://mosecom.ru/map/>) позволяет не только в целом отобразить картину о содержании примесей в воздухе различных городских районов, проследить её изменчивость во времени, но и определить величину эмиссий, как это было, например, показано в работах [1, 2].

Для проведения расчетов содержания загрязняющих примесей: CO, NO, NO₂, O₃ в данной работе, нами была использована транспортно-химическая региональная модель SILAM [3, 4]. Перед собой мы ставили несколько целей, во-первых, сравнение результатов расчетов SILAM с данными наблюдений, а во-вторых, анализ поведения ошибок модели с целью определения гармоник, совпадающих с концентрационными наблюдениями, что позволит понять насколько данные расчеты, оказались полезными в дополнении к наблюдениям. Сетка расчетов модели SILAM, задавалась с шагом 0.10 по долготе и 0.050 по широте на 69 высотных уровнях для метеорологии и на 9 высотных уровнях для описания химических трансформаций. В качестве области расчетов был выбран прямоугольник со сторонами 50.75°–60.70° северной широты и 32.6°–42.5° западной долготы. Достаточно большая область расчетов позволила уменьшить влияние ошибки задания граничных условий на содержание атмосферных загрязняющих примесей в Москве. В качестве периода для расчетов были выбраны два месяца – 1–31 января и 1–31 июля 2014 года. Эти периоды представляют собой интерес для изучения по нескольким причинам. Во-первых, при анализе отличий в поведении содержания загрязняющей веществ в атмосфере Московского мегаполиса в холодный и теплый сезоны. Во-вторых, оба месяца включают в себя перио-

ды с наличием устойчивой воздушной массы, во второй половине месяцев, продолжительностью около двух недель. Во время устойчивой воздушной массы наблюдается снижение скорости приземного ветра, что приводит к опасному для здоровья людей накоплению загрязняющих веществ CO, NO, NO₂, основным источником которых является автотранспорт.

В ходе работы было показано, что лучшее совпадение как суточного хода, так и среднесуточной динамики демонстрируют концентрации CO и NO₂. Эти компоненты результаты численного моделирования достаточно точно воспроизводят, хотя и с некоторыми отличиями в величине пространственной и временной дисперсии концентраций, что объясняется достаточно грубым разрешением модели для описания большого числа неоднородностей городских источников. Более химически активные примеси – NO и O₃ демонстрируют значимое систематическое расхождение между данными наблюдений и моделирования, как в среднем суточном ходе, так и при среднесуточном осреднении. В этом случае результаты численного моделирования требуют статистической коррекции, в частности, нами была предложена модель ошибок для «слияния» данных расчетов и наблюдений, на основе использования фильтра Калмана и знаний о величине ошибок в среднем суточном ходе для летнего и зимнего сезонов.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 19-35-90073.

Литература

1. *Elansky N.F.* Air quality and CO emissions in the Moscow megacity // *Urban Clim.* 2014. V. 8 p. 42–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.0072212-0955/>
2. *Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M.* Air quality and pollutant emissions in the Moscow meg-city in 2005–2014 // *Atmospheric Environment.* 2018. V. 175. p. 54–64.
3. *Vira J., Sofiev M.* Assimilation of surface NO₂ and O₃ observations into the SILAM chemistry transport model. // *Geosci. Model Dev.* 2012. V. 8. P. 191–203. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-191-2015>.
4. *Sofiev M.A.* model for the evaluation of long-term airborne pollution transport at regional and conti-nental scales // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. P. 2481–2493. doi:10.1016/S13522310(99)00415-X, 2000.

Новый метод построения динамических моделей по высокоразмерным данным

А. Ф. Селезнев, Д. Н. Мухин, А. С. Гаврилов, Е. М. Лоскутов, А. М. Фейгин
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Построение динамической модели по наблюдаемым высокоразмерным данным (эмпирическое моделирование), как правило, подразумевает два основных шага: сокращение размерности исходных данных путем выделения относительно небольшого числа главных компонент, которые вносят определяющий вклад в наблюдаемые данные (редукция данных) и построение модели оператора эволюции в полученном пространстве главных компонент. В большинстве существующих на сегодняшний день подходах к построению эмпирических моделей два этих шага делаются независимо друг от друга. В этом случае получаемые в ходе редукции данных главные компоненты могут не отражать информацию о причинно-следственных связях, имеющиеся в исходных данных, что, с одной стороны, делает их плохо пригодными для построения оператора эволюции, а с другой – снижает эффективность самой редукции.

В данной работе предложен оригинальный подход к построению динамических моделей по высокоразмерным данным, сочетающий нелинейную редукцию размерности наблюдаемых данных и построение нелинейного оператора эволюции в рамках единого алгоритма. Получаемые при таком подходе главные компоненты образуют фазовое пространство для имеющейся в данных динамической составляющей, последовательные точки в котором связаны оператором эволюции. Предлагаемая эмпирическая модель состоит из трех основных блоков: блока редукции данных в пространство главных компонент, блока оператора эволюции в этом пространстве, а также блока обратного преобразования в исходное пространство данных. Каждый из блоков параметризуется с помощью искусственной нейронной сети с одним скрытым слоем нейронов (однослойный персептрон), которая является универсальным аппроксиматором произвольных нелинейных зависимостей. Итоговая модель представляет собой многослойную рекуррентную нейронную сеть. Важным преимуществом метода является оптимизация структуры эмпирической модели, препятствующая ее переобучению: оптимальные значения чисел нейронов в каждом из блоков модели и размерность пространства главных компонент находятся в рамках минимизации ценовой функции, получаемой на основе вероятностного байесова подхода.

Эффективность предлагаемого подхода, во-первых, успешно проверена в модельной ситуации, когда сигнал низкоразмерной динамической системы (генератор Ван-дер-Поля и отображение Эно) скрыт в многомерных за-

шумленных данных. Показано, что в этом случае оптимальная размерность пространства главных компонент эмпирической модели совпадает с размерностью фазового пространства системы, сигнал которой лежит в основе многомерных данных. При этом модель хорошо воспроизводит как динамику системы в пространстве данных, так и свойства ее низкоразмерного аттрактора. Во-вторых, метод был применен для моделирования низкочастотной изменчивости в трехуровневой квазигеострофической модели атмосферы средних широт (QG3)- высокоразмерной хаотической системе. Показано, что эмпирическая модель способна корректно воспроизвести наиболее часто посещаемые области в фазовом пространстве системы QG3, соответствующие известным модам атмосферной изменчивости в Северном полушарии, а также статистику времен пребывания фазовой траектории системы в каждой из этих областей.

Построение аналитических критериев выполнения условия фотохимического равновесия малых примесей средней атмосферы

А. Г. Чубаров, М. В. Беликович, М. Ю. Куликов
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Физико-химические процессы с участием малых примесей (МП) играют большую роль в формировании структуры и эволюции атмосферы. В частности, один из основных источников тепла средней атмосферы обусловлен экзотермическими реакциями с их участием. Поэтому наблюдение за пространственно-временной эволюцией МП представляет существенный интерес как с практической, так и с фундаментальной точек зрения. Однако далеко не все МП атмосферы можно измерить прямыми методами (как контактными, так и дистанционными). В такой ситуации естественно использовать непрямые (обратные) методы определения плохо измеряемых компонент по доступным данным наземных и спутниковых измерений, опирающиеся на верифицированные химические модели и следующие из них связи.

Наиболее простое соотношение следует из условия фотохимического равновесия, представляющее собой условие равенства источников и стоков конкретной МП. Однако выполнение этой связи зависит от множества параметров, в частности, от географических координат и локального времени суток. Поэтому ключевым является наличие математических критериев того, что та или иная компонента находится в равновесии с хорошей степенью точности (см, например, [1, 2]), иначе применение условия равенства стоков и источников для данной МП может приводить к большим и неконтролируемым ошибкам в определении неизмеряемых характеристик атмосферы.

В данном докладе на простейшем примере набора реакций нулевого цикла озона демонстрируется методика получения аналитических критериев равновесия озона, атомарного кислорода и семейства O_x ($O+O_3$).

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-05-00471.

Литература

1. *Kulikov M. Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M.* Nighttime Ozone Chemical Equilibrium in the Mesopause Region // *JGR Atmospheres*. 2018. V. 123, № 6. P. 3228–3242.
2. *Kulikov M. Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M.* Boundary of Nighttime Ozone Chemical Equilibrium in the Mesopause Region From SABER Data: Implications for Derivation of Atomic Oxygen and Atomic Hydrogen // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46, № 2. P. 997–1004.

**ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В АТМОСФЕРЕ.
ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ**

Высотные аэроэлектрические профили среднеширотного атмосферного пограничного слоя

*С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, Е. В. Климанова,
А. А. Прохорчук, А. С. Козьмина, А. В. Гурьев*
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Электрическое состояние атмосферного пограничного слоя (АПС) формируется действием глобальной электрической цепи (ГЭЦ), ионизационными процессами в нижней атмосфере, объемной активностью радона и торона, концентрацией и спектральным составом аэрозольных частиц, турбулентным переносом аэроионов, объемных зарядов и аэрозоль [1]. С целью получения натуральных полевых результатов, характеризующих процессы формирования вертикальных распределений концентрации аэрозольных частиц, объемной активности радона, электрической проводимости, напряженности атмосферного электрического поля и плотности вертикального электрического тока, проведены высотные (до 500 метров) аэрофизические зондирования состояния АПС с использованием привязного аэростата [2]. Выполнена серия последовательных подъемов и спусков, а также удерживания платформы на определенных высотах в летние сезоны 2017–2019 гг. Обнаружены долгоживущие слои объемного заряда, оценена скорость изменения заряда в столбе нижней атмосферы. Определен диапазон изменений плотности объемного заряда легких ионов от -20 до 30 пКл/см³ с максимумом непосредственно у земной поверхности. Установлены закономерности изменений высотных профилей напряженности поля, концентрации аэрозольных частиц и объемной активности радона. Выполнены расчеты электрического сопротивления столба, а также потенциала и электродвижущей силы, действующей в АПС, в условиях невозмущенной атмосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФ грант №16-17-10209 (аэростатные наблюдения), РФФИ грант №18-05-00233 (полевые наземные наблюдения) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2019-0023 (обсерваторские наблюдения).

Литература

1. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A., Aphinogenov K.V.* Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // Atmos. Res. 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105035.
2. *Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Прохорчук А.А., Гурьев А.В., Мареев Е.А., Шлюгаев Ю.В., Микрюков П.А.* Электрическое состояние приземной атмосферы по результатам аэростатных наблюдений // Доклады академии наук. 2018. Т. 481. № 2. С. 197–202. DOI:10.31857/S086956520001204-7.

Вариации аэроэлектрического поля над сушей средних широт во время глобальных геомагнитных возмущений

С. В. Анисимов¹, Н. М. Шихова¹, Н. Г. Клейменова^{1,2}

¹ Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Выполнены исследования влияния сильных, очень сильных и гигантских геомагнитных возмущений на изменения напряженности атмосферного электрического поля средних широт с использованием результатов многолетних натуральных наблюдений аэроэлектрического и геомагнитного полей на среднеширотной геофизической обсерватории «Борок» [1, 2]. По данным обсерваторских наблюдений за период 1998–2015 гг. выделено 19 геомагнитных бурь интенсивностью $K_p = 7+ \dots 9$, соответствующих невозмущенным условиям нижней атмосферы (условиям «хорошей погоды»). Приведены примеры вариаций аэроэлектрического поля во время гигантских геомагнитных бурь. Показано, что D_{st} -вариация геомагнитного поля может служить характерным параметром, определяющим статистически значимый отклик геомагнитных планетарных возмущений в атмосферном электрическом поле средних широт. Обнаружено, что для большинства проанализированных амплитудновременных рядов напряженности приземного аэроэлектрического поля (E_z) характерно возрастание величины напряженности атмосферного электрического поля, которое соответствует интервалу достижения D_{st} -вариацией минимальных отрицательных значений, с последующим увеличением E_z до максимальных величин при положительном тренде D_{st} -вариации. Проведенные исследования позволяют заключить, что интенсивные планетарные геомагнитные бури сопровождаются статистически достоверным откликом в вариациях напряженности приземного аэроэлектрического поля в средних широтах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-55-10014) и РФФИ (грант № 18-05-00233) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН (проект 0144-2019-0023).

Литература

1. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли, №10, 2008, С.8–18.
2. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A., Aphinogenov K.V. Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // Atmos. Res. 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105035.

Результаты численного моделирования электричества невозмущенного атмосферного пограничного слоя над морем и однородной поверхностью суши

С. В. Галиченко

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Разработка согласованной модели системы электрических токов, протекающих сквозь нагруженные области атмосферы, ассоциируемые с областями «хорошей погоды», и генераторов, основными из которых считаются молниевые разряды «облако-земля» и квазистатические токи с положительно заряженных вершин грозовых ячеек, дождевых облаков с развитой электрической структурой и мезомасштабных конвективных систем, сталкивается с необходимостью развития подходов к количественному описанию электрических процессов в невозмущенном атмосферном пограничном слое (АПС) над участками земной поверхности с различными свойствами. С целью исследования формирования электрического состояния АПС над морской поверхностью и однородной поверхностью суши, а также оценки вариабельности электрических переменных нижней атмосферы в зависимости от турбулентной динамики АПС, ионосферного потенциала, интенсивности эсхалации инертных радиоактивных газов, геомагнитной широты и фазы цикла солнечной активности, выполнен ряд численных симуляций, в основу которых положен метод переносимой функции плотности вероятности, реализованный через вихреразрешающее моделирование и стохастические кинематические модели турбулентного переноса пассивной примеси в инерционном интервале масштабов [1–4].

В докладе представлен обзор разрабатываемых численных моделей, методов и условий их применимости, а также параметризаций физических процессов, не учитываемых явно. Обсуждаются новые результаты, полученные с помощью рассмотренных моделей, среди которых формирование стратификации электрического поля и объемного заряда нижней атмосферы, полярность конвективной ЭДС, действующей в невозмущенном АПС, и влияние термодинамического форсинга на ее эффективность.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 16-17-10209) и РФФИ (грант № 18-05-00233).

Литература

1. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Mareev E.A.* Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer // Atmos. Res. 2017. V. 194. P. 119–129.
2. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A.* Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability // Boundary-Layer Meteorol. 2018. V. 167. P. 327–348.

3. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A., Kozmina A.S.* Turbulent electric current in the marine convective atmospheric boundary layer // *Atmos. Res.* 2019. V. 228. P. 86–94.
4. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A., Aphinogenov K.V.* Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // *Atmos. Res.* 2020. In Press. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105035.

Основные подходы при моделировании высотных разрядов

А. А. Евтушенко

Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Целое семейство высотных разрядов было открыто около 30 лет назад и сразу привлекло большое внимание ученых. На сегодняшний момент установилась общепринятая классификация высотных разрядов. Выделены 4 типа разрядов: спрайты, эльфы, гало и джеты. С точки зрения возможного влияния на атмосферу, в том числе на химический баланс, наиболее интересными для изучения являются спрайты и джеты. Исследования высотных разрядов проводятся с земли, воздуха и космических аппаратов, накоплено большое количество экспериментальных данных об оптическом и электромагнитном излучении от высотных разрядов. Выяснены характерные параметры разрядов, есть оценки их глобального распределения, но, к сожалению, дистанционные методы изучения разрядов не могут дать полную информацию и возникает необходимость в проведении моделирования, как численного, так и лабораторного. В лекции будут приведены результаты численного моделирования влияния спрайтов на химический состав атмосферы как в ночных, так и в дневных условиях, и результаты лабораторного моделирования спрайтов и гигантских джетов на экспериментальном стенде «Спрайт» в ИПФ РАН.

Моделирование глобальной электрической цепи с помощью численных моделей динамики атмосферы

Н. В. Ильин

Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

В рамках концепции глобальной электрической цепи (ГЭЦ) вся атмосфера рассматривается как распределенный электрический контур, ток в котором поддерживается процессами разделения зарядов в облаках с развитой электрической структурой [1, 2]. При этом в областях, занятых подобными облаками, ток течет вверх, в областях хорошей погоды ток течет вниз, а поверхность Земли и нижняя ионосфера замыкают электрическую цепь. В исследованиях атмосферного электричества последнего времени при анализе глобальных задач подход, ориентированный на ГЭЦ, является общепринятым [3].

Впервые вариации ГЭЦ были промоделированы в модели общей циркуляции атмосферы в работе [4]. Авторы разработали для климатической модели INMCM (Institute of Numerical Mathematics Coupled Model) параметризацию вкладов от ячеек расчетной сетки в ИП в предположении экспоненциального роста проводимости с высотой.

В данной лекции рассмотрены дальнейшие возможности моделирования в этом направлении на основе обобщения параметризации [4] для численной модели прогноза погоды WRF (Weather Research and Forecasting Model). В отличие от климатических, модели прогноза погоды позволяют более детально воспроизвести динамику основных параметров атмосферы (температура, давление, плотность, влажность, скорость ветра), что дает возможность максимально правдоподобно воспроизвести любой заданный день по всей Земле. Это позволяет, в частности, получить лучшее согласие с классической кривой Карнеги и определить вклады различных областей земной поверхности в динамику ионосферного потенциала на различных временных масштабах.

Литература

1. *Анисимов С.В., Мареев Е.А.* Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. 2008. № 10. С. 8–18.
2. *Мареев Е.А.* Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180, № 5. С. 527–534
3. *Williams E., Mareev E.* Recent progress on the global electrical circuit // Atmos. Res. 2014. V. 135–136. P. 208–227.
4. *Mareev E.A., Volodin E.M.* Variation of the global electric circuit and ionospheric potential in a general circulation model // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, no. 24. P. 9009–9016.

Характеристики и модели формирования пиковых токов молниевых разряда

Е. А. Мареев

Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Настоящее исследование посвящено сравнительному анализу особенностей развития грозовых явлений над сушей, над океаном (над морем) и в береговой зоне. Особое внимание уделено разработке технологий своевременного обнаружения опасных явлений на основе комбинированного приема и анализа различных геофизических полей.

Как известно, молниевая активность над сушей в среднем существенно выше, чем над океанами, что видно, например, из обзора данных, полученных с помощью спутников и глобальных систем локации молний [1]. Однако развитие штормов и гроз в береговой зоне обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать при развитии современных систем их дистанционного мониторинга и прогноза.

В работе [2] с использованием данных грозопеленгационной системы GLD360 проведены исследования трех характерных $10^\circ \times 10^\circ$ регионов, в которых наблюдалось усиление пикового тока отрицательных вспышек облако-земля на береговой линии. В этих регионах среднее геометрическое и 95-процентное распределение пикового тока отрицательных вспышек на шельфе оказалось на 22% (88%) и 65% (121%) выше, соответственно, по сравнению с облачными и наземными вспышками в близлежащих районах суши. Новые данные, подтверждающие и уточняющие вышеприведенные выводы, можно найти в статьях [3–5], причем в работе [4], на основе глобальной системы локации молний WWLLN, проанализировано пространственное распределение по земному шару наиболее мощных вспышек с пиковым током более 75 кА, так называемых «суперболтов». Серьезное выяснение причин и механизмов формирования экстремальных пиковых токов молний на шельфе, однако, только начинается (см., например, статью [6]).

Для оценки уровня грозовой активности при развитии конвективных явлений можно пользоваться несколькими методами, которые связаны с особенностями радиоизлучения на разных стадиях развития грозового облака. На ранней стадии наиболее информативным является квазистатическое электрическое поле, определяемое с помощью электростатических флюкметров, не обладающих, однако, высоким пространственным разрешением. Далее начинаются разрядные явления, эффективно обнаруживаемые с помощью КВ приемников. И, наконец, на стадии интенсивной грозовой активности целесообразно использовать СДВ приемники, позволяющие пеленговать молниевые разряды по излучению тока возвратного удара. В ИПФ РАН был создан и апробирован прототип мобильного инструменталь-

ного комплекса для наблюдений интенсивных штормов и гроз в радиодиапазоне, оптическом диапазоне, а также магнитометрических, акустических, сейсмических наблюдений, измерений теллурических полей и токов. В ходе работ были оптимизированы принципы построения и определение состава мобильного инструментального комплекса. Использовалась система регистрации коротких электромагнитных импульсов в диапазоне частот 0.1–30 МГц и определения направления на источник таких импульсов, УКВ интерферометр с пятиканальным синхронным приемником на диапазон частот 50–850 МГц и антенной системой на 400 МГц, а также устройство временной синхронизации всех установок.

Была организована экспедиция для апробации мобильного инструментального комплекса и наблюдений интенсивных штормов и гроз в береговой зоне Черного моря. Мобильный инструментальный комплекс прошел также частичную апробацию в ходе экспедиции на Камчатке (август – сентябрь 2018 г.) Были изучены особенности развития опасных быстроразвивающихся событий на основе проведения расчетов динамики типичного конвективного облака вертикального развития с помощью широко используемой во всем мире модели WRF (Weather Research and Forecasting model) в Верхне-Волжском регионе и на шельфе Черного моря. Разработана и инкорпорирована в модель WRF новая параметризация ионосферного потенциала для глобальных моделей прогнозирования динамики атмосферы [7].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-80077).

Литература

1. *Williams E., Mareev E.* Recent progress on the global electrical circuit // *Atmos. Res.* 2014. V. 135–136. P. 208–227.
2. *Said R.K., Cohen M.B., Inan U.S.* Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, 118, 6905–6915, doi:10.1002/jgrd.50508.
3. *Zoghzoghy F.G., Cohen M.B., Said R.K., Lehtinen N.G., Inan U.S.* Shipborne LF-VLF oceanic lightning observations and modeling // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2015. 120(20), 10–890.
4. *Holzworth R.H., McCarthy M.P., Brundell J.B., Jacobson A.R., Rodger C.J.* Global distribution of superbolts // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2019. V.124, 9996–10,005.
5. *Nag A., Cummins K.L.* Magnetic Field Risetimes of Negative Lightning First Return Strokes Over Land and Ocean // *Geophysical Res. Lett.* 2018, V.45, 13,133–13,141, doi.org/10.1029/2018GL080038.
6. *Asfur M., Price C., Silverman J., Wishkerman A.* Why is lightning more intense over the oceans? // *JASTP.* 2020. V.202, 105259.

Почему происходят молниевые разряды?

Ю. И. Стожков, В. Г. Махмутов, М. В. Филиппов
Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, Москва

До сегодняшнего дня вопрос о причине появления грозových разрядов остается открытым, не смотря на несколько предложенных гипотез, пытающихся объяснить это природное явление. В образовании электрических зарядов в атмосфере главную роль играют космические лучи и радиоактивность (на высотах $H \leq 3$ км). Для образования облаков необходимы определенные атмосферные условия, а для образования грозových облаков, наряду с этими условиями, необходимо наличие электрических зарядов в атмосфере [1, 2].

Известно, что большая часть грозových разрядов происходит внутри грозового облака (внутриоблачные разряды, более 90%). Оставшуюся часть составляют разряды «облако-земля» и «земля-облако» [3]. Для пробоя в атмосфере на уровне моря при нормальных условиях необходима величина напряженности электрического поля $E \approx 30$ кВ/см. Однако, наблюдаемые в атмосфере значения E не превосходят 3 кВ/см.

Для того чтобы понять механизм появления молниевых разряда, было предложено несколько гипотез [1, 4–7]. Одна из них основана на теории убегающих электронов. Суть ее состоит в том, что электроны, образуемые космическими лучами, ускоряются электрическим полем грозового облака, образуют лавину и молниевый разряд [4].

Другой механизм основан на взаимодействии высокоэнергичных частиц космических лучей (энергия частицы $E > 10^{14}$ эВ) с ядрами атомов воздуха, в результате чего в атмосфере образуются ливни частиц (широкие атмосферные ливни). Эти ливни содержат множество ионизованных треков – каналов, по одному из которых и происходит молниевый разряд [1, 2]. В таких ливнях образуются нейтроны и высокоэнергичные мюоны, которые не могут возникнуть в теории убегающих электронов. Регистрация нейтронов и (или) мюонов во время молниевых разрядов могла бы быть доказательством существования второго механизма. К сожалению, на сегодняшний день имеется несколько работ в этом направлении с противоречащими друг другу результатами [5, 6, 8]. Нужно отметить, что частота широких атмосферных ливней достаточна, чтобы объяснить наблюдаемое число молниевых разрядов в грозовом облаке.

Литература

1. *Ermaikov V.I., Stozhkov Y.I.* New mechanism of thundercloud electricity and lightning production // Proc. 11th Int. Conf. Atmospheric Electricity. Guntersville. Alabama (H.J. Christian, ed.). NASA/CP-1999-209261. 1999. P. 242–245.
2. *Ермаков В.И., Стожков Ю.И.* Физика грозových облаков // Препринт ФИАН. 2004. № 2. С. 39 с.

3. *Чалмерс Дж.А.* Атмосферное электричество / Л: Гидрометеоздат, 1974, 424 с.
4. *Гуревич А.В., Караштин А.Н., Рябов В.А., Чубенко А.П., Щепетов А.Л.* Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозвые разряды // УФН, 2009, Т. 179, № 7, 779–790.
5. *Gurevich, A.V., Gurevich V.P. Antonova A.P. Chubenko A.N., Karashtin, et al.* Strong flux of low-energy neutrons produced by thunderstorms // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108, P. 125001-125004.
6. *Gurevich A.V., Antonova V.P., Chubenko A.P., Karashtin A.N., et al.* The time structure of neutron emission during atmospheric discharge // *Atmospheric Research* 164–165 (2015) 339–346.
7. *Иудин Д.Е., Давиденко С.С., Готлиб В.М., Долгоносков М.С., Зеленый Л.М.* Физика молний: новые подходы к моделированию и перспективы спутниковых наблюдений // УФН, 2018, т. 188, № 8, 850–864.
8. *Луковникова А.А., Алешков В.М., Лысак А.С.* Наблюдения нейтронной компоненты в периоды грозовой активности на высокогорной станции космических лучей // *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 5. № 3, 64–69.

Влияние аэрозолей на эволюцию грозовых облаков на примере мощных конвективных событий на территории Нижегородской области

С. О. Дементьева, Н. В. Ильин, Е. А. Мареев
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Грозное облако представляет собой мультикомпонентную среду, содержащую частицы различных типов, движущиеся и взаимодействующие в турбулентных потоках. Столкновения частиц в грозовых облаках обычно сопровождаются процессами электризации, существенное влияние на которые могут оказывать турбулентные и аэрозольные эффекты. Флуктуации относительной скорости частиц, возникающие в турбулентных средах, могут менять электрическую структуру облака и воздействовать на динамику крупномасштабного электрического поля. Присутствие аэрозольных частиц может изменить как микрофизическую, так и электрическую структуру грозовых облаков.

В данной работе выполнено численное моделирование изменений электрических параметров, которые происходят при учете присутствия аэрозольных частиц в грозовых облаках. Для численных экспериментов использована модель прогноза погоды WRF-ARW с двумя встроенными параметризациями микрофизических процессов и параметризацией электрических процессов, разработанной ранее авторами [1]. В первой параметризации микрофизики в облаке присутствуют три фракции твердых гидрометеоров, две фракции жидких гидрометеоров и водяной пар. Во второй параметризации микрофизики имеются те же классы гидрометеоров, описанные в первой параметризации, а также два типа аэрозольных частиц (так называемые water-friendly и ice-friendly аэрозоли), которые представляют собой ядра конденсации и ядра замерзания. В основе параметризации электрических процессов лежит предположение о безындукционном разделении заряда на двух типах твердых гидрометеоров с различными средними размерами. Использование различных микрофизических схем позволяют нам изучать влияние аэрозолей на параметры грозы. В данной работе аэрозольные частицы влияют только на микрофизические процессы в грозовом облаке и не участвуют непосредственно в грозовой электрификации. В то же время они изменяют динамику развития грозы и косвенно влияют на электрические параметры грозового облака.

В качестве объектов моделирования выбран ряд мощных гроз на территории Нижегородской области. Результаты моделирования с использованием указанных параметризаций микрофизики показали, что наличие аэрозолей влияет как на микрофизическую структуру грозового облака, так и на его электрическую структуру. Так, сравнение результатов расчетов с раз-

личными параметризациями микрофизических процессов позволяет отметить различия в структуре грозового фронта при сравнительно близких значениях максимальной радиолокационной отражаемости. Моделирование электрических процессов в грозах с использованием указанных микрофизических параметризаций позволило найти некоторые особенности в распределениях электрического потенциала. Во-первых, разные микрофизические структуры грозовых облаков обуславливают различия в структуре электроактивных зон. Во-вторых, полученные характерные значения электрического потенциала в присутствии аэрозольных частиц превышают аналогичные значения в отсутствие аэрозолей. Как упоминалось ранее, значения максимальной радиолокационной отражаемости изменились не существенно, что означает, что увеличение электрического потенциала может быть вызвано увеличением эффективности разделения заряда без увеличения концентрации числа частиц в ледяной фазе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00975) и Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2019-1892 от 3 декабря 2019 г.).

Литература

1. *Дементьева С.О., Ильин Н.В., Мареев Е.А.* Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 210–217.

Вариации электрических характеристик приземного слоя в различных физико-географических условиях с учетом аэрозольного спектра

Е. В. Егоров^{1,2}, Т. С. Поповская¹, В. А. Болдырева¹, Г. Г. Петрова¹

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

² Высокогорный геофизический институт, Нальчик

По результатам измерений в период совместных экспедиций Южного федерального университета и Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН в рамках Соглашения о научном сотрудничестве продолжены исследования пространственно-временных вариаций параметров электрического поля в приземной атмосфере с учетом динамики аэрозольного спектра. Анализировались данные, полученные на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА РАН в летние месяцы 2018 и 2019 гг. в условиях влажного климата альпийских лугов плато Шаджатмаз (2100 м), в совокупности с данными этого же измерительно-вычислительного комплекса, полученными ранее для условий засушливого климата донских степей на Цимлянской научной станции ИФА. Градиент потенциала на уровне земли измерялся флюксометрами «Поле-2» системы ГГО им. А.И.Воейкова. Методом радиоактивного коллектора были получены данные о вертикальном распределении электрического потенциала в нижнем 4-метровом слое. На основании разностей потенциалов между соседними уровнями и расстояний между ними рассчитывались значения градиента потенциала, средние для каждого слоя.

Обнаружена типичная трансформация вертикального профиля градиента потенциала при изменении аэрозольного спектра на плато Шаджатмаз, по результатам обоих сезонов наблюдений. При этом концентрация аэрозолей на плато тесно коррелирует с относительной влажностью воздуха, что указывает на конденсационную природу аэрозоля. Обнаружена тесная регрессионная связь с аэрозолями (диаметр частиц $> 0,1$ мкм) градиента потенциала на уровне земной поверхности, полученная по сгруппированным данным: $G_0 = 49 + 0,05N$ для 2018 и для 2019 (размерность для G_0 – В/м, для N – см^{-3}). В соответствии с уравнением регрессии, имеет место увеличение градиента потенциала на уровне земли с ростом концентрации аэрозолей в атмосфере, что косвенно свидетельствует о положительном объёмном заряде, дислоцированном на аэрозольных частицах. Следует отметить, что рассчитанное по данным измерений в засушливых условиях Цимлянска в августе 2017 года уравнение регрессии свидетельствует об отрицательном заряде аэрозолей, образованных в результате процессов диспергации (пыль, дым) [1].

Литература

1. Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Петров А.И., Егоров Е.В., Болдырева В.А. Результаты атмосферно-электрических измерений в приземном слое с учётом аэрозолей субмикронного диапазона // Материалы Четвёртой Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь». Ярославль: Филигрань, 2019. С. 62.

Исследование зависимости напряженности поля от солнечных вспышек

З. М. Керефова^{1,2}, А. А. Черкесов¹

¹ ФГБОУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик

² Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М.Бербекова, Нальчик

Солнечные вспышки являются одним из ярких проявлений солнечной активности [1–3]. В работе, приведены характеристики солнечных вспышек С-, М-, X- классов, коррелируемые с электрическим полем. Влияние галактических космических лучей и солнечных протонов на циркуляционный режим нижней атмосферы было описано в работах [4–6].

В работе представлены изменения среднесуточной напряженности электрического поля приземной атмосферы и характеристик солнечных вспышек С-, М-, X- класса за сентябрь 2017г.

На рисунке 1 представлены изменения среднесуточной напряженности электрического поля приземной атмосферы и характеристик солнечных вспышек С-, М-, X- класса за сентябрь 2017г.

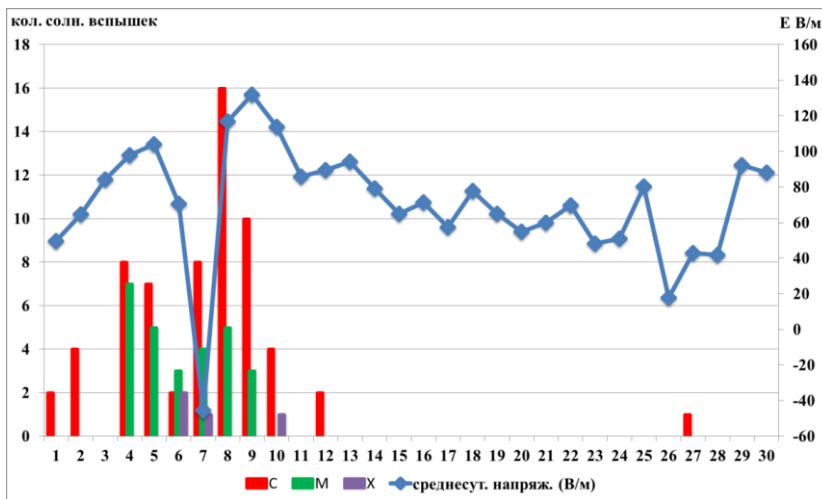


Рис 1. Изменения среднесуточной напряженности электрического поля приземной атмосферы и характеристик солнечных вспышек С-, М-, X- класса за сентябрь 2017г.

Из рисунка 1 видно, что с 1 по 12 сентября 2017г были активные солнечные вспышки С-, М-, X- класса. При этом, в отдельные дни количество вспышек М- класса составляло от 1 до 7. С- класса от 1 до 16 вспышек и X- класса от 1 до 2 вспышек в день. Во второй части сентября на солнце не отмечались вспышки М- и X- класса, и только произошла одна вспышка С- класса 27 сентября 2017г. Выделена реакция атмосферного электричества на

солнечные вспышки с 1 по 12 сентября в виде значительных амплитудных изменений значения напряженности поля от +110 В/м до -50 В/м и от -50 в/м до 140 В/м при отсутствии в зоне регистрации погодных явлений, т.е. в указанные периоды отмечалось условие «хорошей» погоды

Следует отметить, что поле «хорошей» погоды всегда положительного знака. Как следует из рисунка 1 при интенсивных солнечных вспышках с 1 по 12 сентября «нормальный» положительный ход поля изменился на отрицательный с 6 по 8 сентября 2017 г. Среднесуточная амплитуда изменений значения напряженности поля, рассчитанная по формуле:

$$A_C = \sum (E_{i+1} - E_i) / N_C, \quad (1)$$

где N_C – число дней с солнечными вспышками ($N_C = 12$); A_C – среднесуточная амплитуда изменений значения напряженности поля при наличии солнечных вспышек, E_i – среднесуточная напряженность поля в i день, E_{i+1} – среднесуточная напряженность поля в $i + 1$ день, составляет 84, N – число дней с без солнечных вспышек ($N = 18$). Во второй части сентября с 13 по 30 сентября 2017г на следующие сутки после вспышки, величина E менялась примерно на 12%. Среднесуточная амплитуда изменений значения напряженности поля при отсутствии солнечных вспышек A , вычисленная по формуле (1) для второй части рассматриваемого периода составила 59 ($N = 18$). Следовательно, различие в значениях N_C и N составило 25.

При проведении работы получены следующие результаты:

- Выделена реакция атмосферного электричества на солнечные вспышки с 1 по 12 сентября в виде значительных амплитудных изменений значения напряженности поля от -50 В/м до 140 В/м.

- Расчетная среднесуточная амплитуда изменений значения напряженности поля при наличии солнечных вспышек превышает расчетную среднесуточную амплитуду изменений значения напряженности поля при отсутствии солнечных вспышек и составляет 25.

Литература

1. *Somov B.V.* Physical Processes in Solar Flares. Dordrecht; Boston; L., 1992.
2. *Mitra A.P.* Ionospheric Effects of Solar Flares. Norwell, MA, 1974.
3. *Hoffmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.* Global Positioning System: Theory and Practice. N. Y.; Wien, 1992.
4. *Nicoll K.A., Harrison R.G. et al.* – A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics. 2019. V. 184. P. 18–29.
5. *Tinsley B.A., Brown G.M., Scherrer P.H.* Solar variability influences on weather and climate: Possible connection through cosmic ray fluxes and storm intensification//J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 14783–14792.
6. *Tinsley B. A., Heelis R. A.* Correlations of atmospheric dynamics with solar activity: Evidence for a connection via the solar wind, atmospheric electricity, and cloud microphysics // Ibid. 1993. V. 98. P. 10375–10384.

**Высотные профили объемной активности радона,
интенсивности ионообразования
и электрической проводимости:
результаты наблюдений и модельные оценки**

Е. В. Климанова, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Образование ионов в атмосфере происходит в результате каскадного взаимодействия электронных оболочек атомов с частицами и квантами электромагнитного излучения высоких энергий, источниками которых являются естественные радиоактивные элементы, содержащиеся в верхнем слое земной коры, выделяющиеся из грунтовых пород и распадающиеся в нижней атмосфере вместе со своими короткоживущими дочерними продуктами инертные радиоактивные газы, а также галактические и, в меньшей степени, солнечные космические лучи. Непрерывная ионизация атмосферы формирует электрическую проводимость, обеспечивая возможность функционирования ЭДС, поддерживающей глобальную разность потенциалов. Неравновесный диссипативный электрический токовый контур, связывающий области действия генераторов с невозмущенными нагрузочными областями атмосферы, формирует глобальную электрическую цепь (ГЭЦ). Для исследования динамики и вариабельности ГЭЦ используют наземные комплексы, привязные аэростаты, управляемые и беспилотные летательные аппараты, а также спутники [1, 2]. Аэростат в качестве средства управляемого подъема измерительной аппаратуры предоставляет возможность проводить длительные непрерывные наблюдения на фиксированной высоте, а также реверсивные измерения высотных профилей параметров нижнего невозмущенного участка ГЭЦ [3–5].

Высотные измерения электрических и сопутствующих аэрофизических величин проводились на полигоне Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН в 2019 г. с помощью привязного аэростата и прикрепленной к нему аппаратной платформы, оснащенной средствами измерений объемной активности радона, полярных электрических проводимостей, концентрации аэрозольных частиц в диапазоне диаметров 0.3–25 мкм, напряженности электрического поля и метеорологических параметров. На основе анализа высотных профилей объемной активности радона, концентрации аэрозольных частиц и удельной электрической проводимости выполнены оценки средних значений и диапазона вариабельности скорости эсхалляции радона и интенсивности ионообразования. Исследована вариабельность полярных электрических проводимостей в дневное и ночное время суток на различных высотах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №16-17-10209 (аэростатные наблюдения и численное моделирование), Российского фонда фундаментальных исследований, грант №18-05-00233 (полевые натурные наблюдения) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2014-00155 (обсерваторские наблюдения).

Литература

1. *Nicoll K.A., Harrison R.G., Silva H.G., Salgado R., Melgão M., Bortoli D.* Electrical sensing of the dynamical structure of the planetary boundary layer // *Atmos. Res.* 2018. V. 202. P. 81–95.
2. *Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Гурьев А.В.* Аппаратная платформа аэростатных аэроэлектрических наблюдений // *Научное приборостроение.* 2017. Т. 27. № 1 С. 24–28.
3. *Marshall T.C., Rust W.D., Stolzenburg M., Roeder W.P., Krehbiel P.R.* A study of enhanced fair-weather electric fields occurring soon after sunrise // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, № D20. P. 24 455–24 469.
4. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Guriev A.V., Kozmina A.S., Prokhorchuk A.A., Klimanova E.V.* Electricity of mid-latitude atmospheric boundary layer above land: results of observations and numerical modeling // *IOP Conference Series: Earth and Environment Science.* 2019. V. 231, 012007.
5. *Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Мареев Е.А., Шлюгаев Ю.В., Прохорчук А.А., Гурьев А.В., Микрюков П.А.* Электрическое состояние приземной атмосферы по результатам аэростатных наблюдений // *Доклады Академии наук.* 2018. Т. 481, вып. 2. С. 197–202.

Суточная вариация объемной активности торона в приземной атмосфере

А. С. Козьмина, Э. М. Дмитриев

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Альфа-распады изотопов радона Rn^{222} и Rn^{220} (торон) вносят наибольший вклад в ионизацию приземной атмосферы [1]. Суточная вариация их объемной активности (ОА) определяется вариациями атмосферной турбулентности и может быть описана уравнением турбулентной диффузии. При этом суточная вариация высотного профиля коэффициента турбулентной диффузии в приземном слое задается по данным наблюдений.

Решение уравнения турбулентной диффузии для высотного профиля ОА Rn^{222} может быть получено при задании двух граничных условий: плотности потока и ОА Rn^{222} у земной поверхности, оцениваемых по данным наблюдений [2]. Применение такого подхода к оценке суточной вариации ОА Rn^{220} затруднительно, ввиду возникающих при измерениях фоновой ОА Rn^{220} сложностей [3]. Однако, в отличие от Rn^{222} , Rn^{220} полностью распадается в приземной атмосфере, что позволяет при оценке вариаций его ОА ограничиться заданием потока Rn^{220} с земной поверхности, полагая ОА Rn^{220} исчезающе малой на верхней границе приземного слоя.

В данной работе с использованием вышеописанного подхода по данным полевых натуральных наблюдений на измерительном полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН представлены характерные для условий «хорошей погоды» суточные вариации ОА Rn^{220} . Плотность потока Rn^{220} с земной поверхности оценена по данным наблюдений сейсмической радоновой станции «СРС-05» [3]. Суточные вариации высотного профиля коэффициента турбулентной диффузии рассчитаны по данным наблюдений двух ультразвуковых метеокомплексов «Метео-2М», установленных на высотах 2 м и 10 м.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-17-10209) и РФФИ (проект № 18-05-00233).

Литература

1. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A.* Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability // *Boundary-Layer Meteorol.* 2018. V. 167, P. 327–348. DOI: 10.1007/s10546-017-0328-0
2. *Anisimov S.V., Dmitriev E.M., Aphinogenov K.V., Guriev A.V., Kozmina A.S.* Variability of radon distribution in the atmospheric surface layer over the land of middle latitudes // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019. V. 231, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012006
3. *Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Козьмина А.С.* Фоновая объемная активность радона и торона в почве и приземной атмосфере по наблюдениям сейсмической радоновой станции // *Сейсмические приборы.* 2019. Т. 55. № 4. С. 5–16. DOI: 10.21455/si2019.4-1

Дипольное электромагнитное излучение, генерируемое нелинейными осцилляциями заряженной капли в суперпозиции гравитационного и однородного электростатического полей

Н. Ю. Колбнева

Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

Исследование капиллярных осцилляций заряженной поверхности капля жидкости и радиоизлучения от таких объектов находит практическое применение в радиолокации в связи с проблемами радиолокационного зондирования облаков и туманов, в авиации в связи с проблемами управления воздушным движением, в метеорологии и геофизике с целью усовершенствования методов прогноза опасных метеорологических и атмосферных электрических явлений.

Расчеты капиллярных осцилляций заряженных капель во внешних электростатических полях предполагают использование двух малых параметров: в качестве первого малого параметра, характеризующего стационарную деформацию капли, принят квадрат эксцентриситета e^2 , второго малого параметра – отношение амплитуды осцилляций к радиусу капли $\varepsilon = \xi/R$.

При этом в асимптотических расчетах следует четко определять порядки малости параметров ε и e^2 по отношению друг к другу.

Большинство работ по расчету капиллярных осцилляций заряженной поверхности капля выполнены в линейном приближении по ε .

На сегодняшний день нелинейные аналитические асимптотические расчеты выполнены лишь в предположении, что $\varepsilon \sim e^2$, т.е. сведены к одному малому параметру ε .

Однако нелинейные расчеты при использовании двух независимых малых параметров ($e^2 \ll \varepsilon$) уже существенно более громоздки и их никто не выполнял.

В связи с этим данная работа посвящена аналитическому асимптотическому исследованию во втором порядке малости по ε и в первом по e^2 капиллярных осцилляций заряженной капли идеальной несжимаемой идеально проводящей жидкости, неподвижно висящей в суперпозиции гравитационного и внешнего однородного электростатического полей, и изучению возникающего при этом дипольного электромагнитного излучения.

Под действием внешнего электрического поля капля вытягивается в сфероид, на полюсах капли появляются разноименные индуцированные заряды.

На поверхности капли существует капиллярное волновое движение, приводящее к искажению равновесной сфероидальной формы капли. Соб-

ственный и индуцированные внешним электрическим полем заряды распределяются по возмущенной поверхности капли.

Математическая постановка задачи о капиллярных осцилляциях заряженной капли в суперпозиции гравитационного и электростатического полей состоит из основных уравнений электрогидродинамики идеальной, несжимаемой проводящей жидкости с граничными условиями.

Введены дополнительные условия: сохранения объема капли, неподвижности её центра масс и сохранения полного заряда капли. Начальные условия заданы в виде начальной деформации равновесной формы капли и равенства нулю скорости движения поверхности капли.

Для отыскания решения поставленной нелинейной задачи используется метод многих масштабов. Для этого искомые величины разложены в ряды по степеням ϵ с точностью до второго порядка и зависят от разных масштабов времени.

В расчетах нулевого порядка малости по ϵ найден равновесный электрический потенциал и форма равновесной поверхности капли, которая с точностью до e^2 совпала с уравнением вытянутого сфероида.

В расчетах первого и второго порядков малости по ϵ найдены последовательные поправки к возмущению поверхности капли и электрическому потенциалу, связанные с возмущением поверхности капли.

Капля смоделирована в виде диполя с точечными зарядами, разнесенными на определенное расстояние на оси симметрии сфероида, и собственным зарядом, расположенным в центре масс капли.

«Центры» всех этих зарядов и величина эффективных индуцированных зарядов осциллируют при капиллярных осцилляциях поверхности сфероида и излучают электромагнитные волны дипольного типа.

Интенсивность излучения такой капли смоделирована в виде излучений от диполя осциллирующей капли и осциллирующего положения собственного заряда капли.

В аналитической асимптотической процедуре определены поверхностные плотности собственного и индуцированного зарядов, зависящий от времени дипольный момент сфероидальной капли и осцилляции положения собственного заряда капли и по формулам общей теории излучения оценена их интенсивность излучений.

Показано, что асимптотические расчеты второго порядка малости по ϵ приводят к незначительной нелинейной поправке к величине диполя, найденного в линейных расчетах. В расчетах первого порядка малости по ϵ смещение центра собственного заряда капли отсутствует и обнаруживается только во втором порядке малости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 19-71-30012).

Пространственные распределения концентрации и электрического поля аэроионов, генерируемых при коронном разряде в приземном слое атмосферы

А. В. Колосов^{1,2}, Ю. В. Шлюгаев¹

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород

Возникший интерес ученых к изучению влияния ионизации приземного слоя атмосферы на метеорологические процессы [1] привлёк и наше внимание. Первым этапом было решено экспериментально исследовать, какие изменения в состав атмосферного воздуха вносит коронирующий электрод. В эксперименте использовалось следующее оборудование и материалы: высоковольтный источник постоянного напряжения до 100 кВ положительной и отрицательной полярностей; тонкий вольфрамовый провод, диаметром 0.06 мм; электростатический флюксметр; измеритель полярных проводимостей и счетчик аэроионов (измеритель концентрации частиц диаметром 0.3 – 5 мкм) TSI AeroTrak 9303.

На вольфрамовый провод, размещенный горизонтально, подавалось высокое напряжение, достаточное для инициализации коронного разряда. При этом, экспериментатор с помощью флюксметра измерял электрическое поле в зависимости от расстояния до провода. Также проводились измерения проводимости воздуха и концентрации частиц (для трех диаметров частиц: 0.3, 0.5 и 5 мкм) в зависимости от расстояния до коронирующего провода. Стоит отметить, что была произведена сравнительная характеристика измеренных параметров как при ионизации воздуха вне помещения, так и в помещении лаборатории.

Анализ результатов экспериментов показывает привнесение в атмосферу коронирующим проводом большого числа крупных (вероятно, гидратированных) частиц диаметром около 5 мкм, по сравнению с фоновыми значениями концентрации. Также, в области повышения концентрации регистрируемых частиц фиксируется повышение величины электрического поля в несколько раз, в сравнении с фоновым значением электрического поля Земли. Измерителем полярных проводимостей получено среднее абсолютное значение проводимости (в области повышения концентрации частиц) порядка $10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ (для справки: фоновое значение проводимости составляло $10^{-17} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$).

Литература

1. *Chambers R., Beare S., Al-Kalbani M.* Using ground-based ionization to enhance rainfall in the Hajar Mountains, Oman // *Arabian Journal of Geosciences.* 2016. 9. 10.1007/s12517-016-2515-6.

Ионная зарядка аэрозольных частиц в нижней атмосфере

А. А. Прохорчук, С. В. Галиченко, С. В. Анисимов,
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

В результате интенсивных исследований, направленных на определение роли аэрозольных частиц в атмосферных процессах и эволюции климатической системы, достигнуто понимание, что атмосферный аэрозоль служит важнейшим элементом глобальной динамики атмосферы и планетарной электрической цепи. В биполярном ионном окружении присутствие аэрозольных частиц вызывает уменьшение концентрации легких ионов вследствие их присоединения к аэрозольным частицам. Зарядка аэрозольных частиц, в свою очередь, влияет на скорость их коагуляции и таким образом меняет распределение аэрозольных частиц по размерам, от которого зависит парциальная скорость зарядки аэрозольных частиц определенной размерной фракции и концентрация легких ионов, определяющая электрическую проводимость воздуха [1, 2].

В результате численного решения системы уравнений, описывающих кинетику легких ионов в присутствии полидисперсного аэрозоля с заданным трехмодовым распределением частиц по размерам, получены распределения суммарной плотности заряда и парциальных потоков легких ионов на аэрозольные частицы для конечного числа размерных фракций аэрозольных частиц. В расчетах использованы измеренные над различными участками земной поверхности функции распределения аэрозольных частиц по размерам [3–5] в предположении начальной электрической нейтральности аэрозольной подсистемы. При этом факторы внешнего электрического поля, переноса и коагуляции не учитывались. Исследовано влияние вариабельности распределения аэрозольных частиц по размерам, полной счетной концентрации аэрозолей, начальной объемной плотности заряда на процесс зарядки для частиц из диапазона с размерами 0.02–1 мкм. Коэффициенты присоединения были вычислены согласно [6].

Установлено, что на отношение η равновесных концентрации отрицательных легких ионов к концентрации положительных влияют как полная счетная концентрация аэрозольных частиц, так и распределение частиц по размерам. Показано, что для рассмотренных распределений аэрозольных частиц по размерам и полной счетной концентрации, не превосходящей $4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, отношение $\eta \geq 0.87$. Для распределения из эксперимента ACE1 [3], характеризующегося относительно малой полной счетной концентрацией частиц, в процессе ионной зарядки суммарная плотность заряда каждой из размерных фракций аэрозольных частиц остается отрицательной даже при первоначальной плотности заряда всей рассмотренной системы взаимодействующих частиц +200 элементарных зарядов на см^3 . При этом изменение суммарной плотности заряда аккумуляционной моды на порядок боль-

ше, чем моды Айткена или моды крупных частиц (с диаметрами ~ 1 мкм). Выполнена оценка влияния влажности воздуха и связанного с ней роста размера гигроскопических аэрозольных частиц на распределение плотности заряда по размерным фракциям.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 16-17-10209).

Литература

1. Yair Y., Levin Z. Charging of Polydispersed Aerosol Particles by Attachment of Atmospheric Ions // *Journal of Geophysical Research*. 1989. V. 94. № D11. P. 13085–13091.
2. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A. Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability // *Boundary-Layer Meteorol.* 2018. V. 167, № 2. P. 327–348.
3. Bates T.S., Kapustin V.N., Quinn P.K. et. al. Processes controlling the distribution of aerosol particles in the lower marine boundary layer during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1) // *Journal of Geophysical Research*. 1998. V. 103, № D13. P. 16369–16383.
4. Petzold A., Fiebig M., Flentje H. et. al. Vertical variability of aerosol properties observed at a continental site during the Lindenberg Aerosol Characterization Experiment (LACE 98) // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 107, № D21. P. 8128.
5. Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Березина Е.В. и др. Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA — Изд. Агроспас Москва, 2009. — 81 с.
6. López-Yglesias X., Flagan R.C. Ion-aerosol flux coefficient and the steady-state charge distribution of aerosols in a bipolar ion environment // *Aerosol Science and Technology*. 2013. V. 47, № 6. P. 688–704.

Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитные бури

С. А. Рябова

Институт динамики геосфер им. М.А.Садовского РАН, Москва

Известные в настоящее время результаты исследований эффектов солнечной активности и связанных с ней геомагнитных бурь в атмосферном электричестве на авроральных и средних широтах очень ограничены и довольно противоречивы [1–3]. Последнее обстоятельство может быть связано не только с особенностями развития разных бурь и сопутствующих им процессов в приземной атмосфере, но и с состоянием атмосферы и ионосферы до и во время магнитной бури, особенностями локальных условий в месте регистрации геомагнитных вариаций.

В настоящей работе выполняется анализ вариаций напряженности электрического поля (вертикальная компонента) и вертикального атмосферного тока с привлечением данных со среднеширотной Геофизической обсерватории «Михнево» и Центра геофизического мониторинга г. Москвы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук.

Оценка магнитной обстановки выполнена по данным измерений трех компонент индукции магнитного поля с помощью феррозондового цифрового магнетометра LEMI-018. За период с 2016 по 2019 г. были отобраны временные интервалы, характеризующиеся повышенной геомагнитной активностью и условиями, близкими к так называемым «условиям хорошей погоды» [4].

Измерения вертикальной компоненты напряженности электрического поля (E_z) и вертикального атмосферного тока (I) в приземном слое атмосферы осуществлялись соответственно с помощью статического флюксметра ИНЭП в диапазоне частот 0–20 Гц [5] и компенсационного регистратора тока [6]. Для анализа использовались ряды цифровых записей, сформированные с дискретностью 5 с.

В результате обработки и анализа экспериментальных данных установлено, что сопутствующие магнитным бурям с геомагнитным К-индексом больше 4 повышенные вариации электрического поля и вертикального атмосферного тока характеризуются разной морфологической структурой. При этом наблюдаются: знакопеременные вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля (~ 50% случаев); положительное бухтообразное изменение E_z (~ 17% случаев); и наконец, отрицательное бухтообразное изменение E_z (~ 33% случаев). При сложном знакоперемен-

ном характере магнитных вариаций в вариациях атмосферного тока I обнаруживаются колебания в виде пульсаций.

Литература

1. *Апсен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П., Шефтель В.М.* Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве – М.: Наука, 1988. – 150 с.
2. *Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М.* Эффект магнитных бурь в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // Геомагнетизм и аэрномия. 2008. Т. 48. № 5. С. 650–659.
3. *Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В.* Вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 2013. Т. 53. № 4. С. 532–545.
4. *Israelsson S.* On the conception – fair weather condition in atmospheric electricity // Pure and Applied Geophysics. 1978. Vol. 116. P. 149–158.
5. *Адушкин В.В., Соловьев С.П., Стивак А.А.* Электрические поля техногенных и природных процессов – М.: ГЕОС, 2018. – 464 с.
6. *Барышев В.И., Вагг Л.Л., Гаврилов Б.Г., Полетаев А.С.* Датчик приземного вертикального тока атмосферы // Проблемы взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС, 2009. С. 358–364.

Метеоусловия ускорения энергичных частиц в облаке

Е. К. Свечникова, Н. В. Ильин, Е. А. Мареев

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Исследованы свойства облаков, обуславливающих события приземного увеличения потока энергичных частиц (фотонов и электронов с энергией 10 кэВ–100 МэВ), наблюдаемые на горной исследовательской станции Арагац в Армении [1]. Численная симуляция состояния атмосферы выполнена с помощью The Weather Research and Forecasting Model. Результат моделирования сопоставлен с данными наземных измерений электрического поля и потока частиц, а также со спутниковыми наблюдениями в ИК- и оптическом диапазоне. Получена оценка распределения гидрометеоров и электрического заряда в облаках, создающих направленные к земле потоки энергичных частиц [2]. Обнаружено существенное отличие метеорологических параметров для событий, наблюдаемых в летнем и зимнем сезонах. Развитие наиболее интенсивных летних событий происходит при наличии в облаке нижнего положительно заряженного слоя частиц снежной крупы и верхнего отрицательно заряженного слоя частиц снега. Зимние события обнаруживают определяющую роль отрицательно заряженных частиц льда.

Метеорологические характеристики облаков, создающих приземные увеличения потока энергичных частиц, оказываются во многом сходными со свойствами облаков, генерирующих земные гамма-вспышки, что свидетельствует в пользу общности механизма двух видов энергичных атмосферных явлений.

Литература

1. *Chilingarian A.* Thunderstorm Ground Enhancements — model and relation to lightning flashes // JASTP. 2014. V. 107. P. 68–76.
2. *Svechnikova E. K., Ilin N. V., Mareev E. A.* Recovery of electrical structure of the cloud with use of ground-based measurement results // Proceedings of TEPA-2018. P. 76–80.

Моделирование процесса формирования пространственного стема на периферии стримерной короны отрицательного лидера молнии

А. А. Сысоев^{1,2}, Д. И. Иудин^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² Приволжский исследовательский медицинский университет, Н. Новгород

Давно известно, что отрицательные лидеры в воздухе всегда распространяются ступенчатым образом. Появление каждой ступени отрицательного лидера сопровождается встречей пространственного лидера с основным отрицательным и оканчивается мощной вспышкой короны отрицательных стримеров (см. [1] и ссылки там). Принято считать, что пространственные стемя, вытянутые вдоль направления электрического поля плазменные образования объёмом порядка 1 см^3 (в лабораторных условиях), являющиеся потенциальными зачатками пространственных лидеров, формируются перед головкой отрицательного лидера во время вспышки короны отрицательных стримеров. Авторы монографии [2, с. 92] характеризуют картину испускания изолированными от канала лидера пространственными стемями положительных и отрицательных стримеров словами «прямо-таки мистическая». Недавно в работе [3] был предложен механизм формирования пространственных стемов, в основе которого лежит прилипательная неустойчивость, развивающаяся в участках канала отрицательного стримера с падающей проводимостью. Насколько известно авторам данного исследования, на настоящий момент каких-либо других механизмов происхождения пространственных стемов предложено не было.

В данной работе для описания процесса формирования пространственных стемов в диапазоне высот от 0 до 12 км была разработана мелкомасштабная двумерная модель, описывающая пространственно-временную эволюцию концентраций электронов и положительных и отрицательных ионов на периферии стримерной короны отрицательного лидера. Основой модели является система семи дифференциальных уравнений для плотностей электронов и трёх типов положительных (O_2^+ , N_2^+ и O_4^+) и отрицательных (O^- , O_2^- и O_3^-) ионов с учётом связывающих их плазмохимических процессов и дрейфа электронов в электрическом поле. На базе модели была проанализирована гипотеза о том, что формирование предшествующих пространственным стемям центров ионизации на границе стримерной короны отрицательного лидера происходит под действием пространственно-временного шума, элементами которого являются заряженные останки головок остановившихся отрицательных стримеров, формирующих корону лидера. Исследуемая схема формирования предшественников пространственных стемов базируется на кумулятивном эффекте (экспоненциальный

рост концентрации заряженных частиц каждый раз становится все более эффективным, так как начинается не с фонового, а со всё более высокого уровня) и в общих чертах напоминает предложенный в недавней работе [4] механизм инициации молнии. Показано, что необходимым условием реализации предложенного механизма является высокое (по сравнению со средним уровнем), но достижимое значение локальной интенсивности пространственно-временного шума. Упрощённая схема исследуемого механизма приведена на рисунке 1.

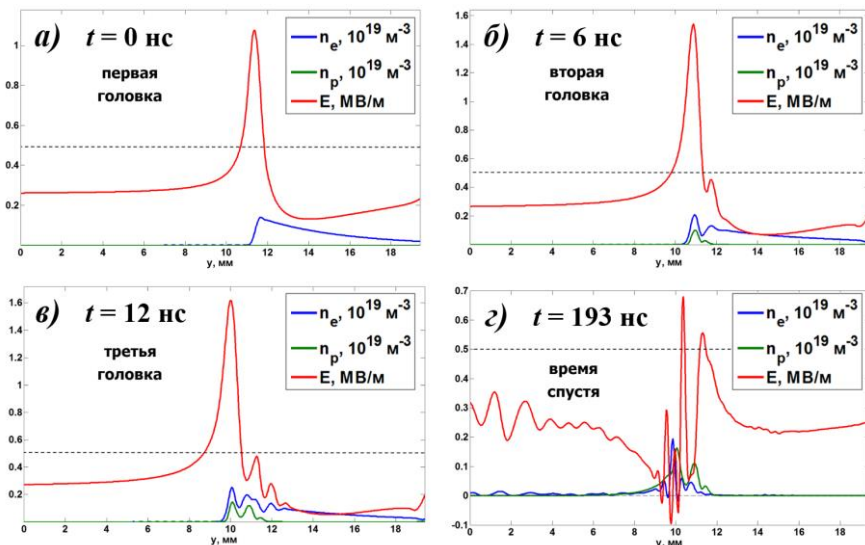


Рис. 1. Идеализированная схема исследуемого механизма, демонстрирующая работу кумулятивного эффекта роста концентраций носителей заряда, представленная для высоты 12 км над уровнем моря. Чёрный пунктир показывает уровень критического поля пробоя на данной высоте.

Литература

1. Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A., Rakov V.A. Numerical simulation of stepping and branching processes in nega-tive lightning leaders // J. Geophys. Res. Atmos. 2020. Accepted. doi:10.1029/2019JD031360.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты – М. : Физматлит, 2001. – 320 с.
3. Malagón-Romero A., Luque A. Spontaneous Emergence of Space Stems Ahead of Nega-tive Leaders in Lightning and Long Sparks // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46, № 7. P. 4029–4038.
4. Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., Hayakawa M. Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds // npj Climate and Atmospheric Science. 2019. V. 2, № 46. doi:10.1038/s41612-019-0102-8.

Характеристики облаков, переходящих в грозовую стадию, по радиолокационным измерениям

М. Л. Торопова, В. Б. Попов

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

В настоящий момент одним из наиболее удобных и перспективных инструментов получения данных о взаимосвязях макро- и микроструктуры кучево-дождевых облаков и электрических процессов являются метеорологические радиолокаторы. Особый интерес представляют характеристики конвективных облаков, переходящих в грозовую стадию – такие исследования позволяют изучить особенности протекания физических процессов в облаках и имеют прикладное значение (разработка предикторов грозы, которые могут быть использованы при наукастинге). В настоящем исследовании представлен сравнительный анализ статистических характеристик облаков, переходящих в грозовую стадию для двух районов: Северо-Запад России и Северный Кавказ, также приводятся результаты аналогичного исследования для Индии.

В работе для двух регионов России проанализированы выборки по 60 облаков, переходящих в грозовую стадию – их радиолокационные характеристики в момент начала разрядов и до него. Использовались радиолокационные данные: МРЛ-5 (Ставрополь) и ДМРЛ-С (Санкт-Петербург), а также данные грозопеленгационных систем.

Авторами для рассмотрения были выбраны следующие характеристики облаков: высота верхней границы облака по уровню отражаемости 5 dBZ (H_{top}), высота, на которой обнаружена максимальная радиолокационная отражаемость Z_{max} (H_{Zmax}), высота, на которой обнаружена Z_{max} , относительно изотермы 0°C (dH_{Zmax}), толщина облака выше изотермы 0°C с отражаемостью, превышающей порог 35 dBZ (dH_{35}), объем облака выше изотермы 0°C с отражаемостью, превышающей порог 35 dBZ (dV_{35}), высота облака с отражаемостью, превышающей порог 35 dBZ (H_{35}), объем облака с отражаемостью, превышающей порог 35 dBZ (V_{35}).

Проведен анализ различия выборок до и в момент первых разрядов для каждого параметра и по каждому региону с использованием непараметрического метода – критерия знаковых рангов Уилкоксона [1]. Показано, что большая часть анализируемых характеристик имеет значимые статистические различия для моментов во время разрядов и до них (p -value < 0.01). На диаграмме рисунка 1 показаны распределения параметров.

По рисунку 1 видно, что в целом все характеристики (кроме H_{Zmax} и dH_{Zmax}) при переходе облаков в грозовую стадию увеличиваются. Лучше всего это видно по медиане V_{35} для Северного Кавказа, которая увеличилась на 114%.

Таким образом, переход облаков в грозовую стадию сопровождается увеличением их высоты и объема. $H_{Z_{\max}}$ и $dH_{Z_{\max}}$ в целом уменьшаются, что можно связать с усилением процесса осадкообразования.

Если сравнивать характеристики двух регионов, то можно отметить, что параметры dV_{35} , V_{35} , H_{35} , H_{top} для облаков Северного Кавказа в целом больше, чем для Северо-Запада России. Это можно объяснить большим прогревом атмосферы в более южном Северном Кавказе. Стоит выделить $dH_{Z_{\max}}$, которая для Северного Кавказа в основном имеет положительные значения, а для Северо-Запада России – отрицательные. Возможно, это связано с тем, что на Северном Кавказе грозовая активность облаков начинается на раннем периоде выпадения осадков, когда ещё происходит рост ледяных частиц выше уровня 0°C . 75% выборки параметра dH_{35} для обоих регионов за 10 минут до грозовой активности не превышает 3.7 км, а в момент первых разрядов большая часть выборки находится выше 3.7 км. Это может свидетельствовать о том, что независимо от региона, в большинстве случаев при превышении уровня 3.7 км переохлажденной части облака с крупными ледяными частицами в облаках начинается грозовая активность.

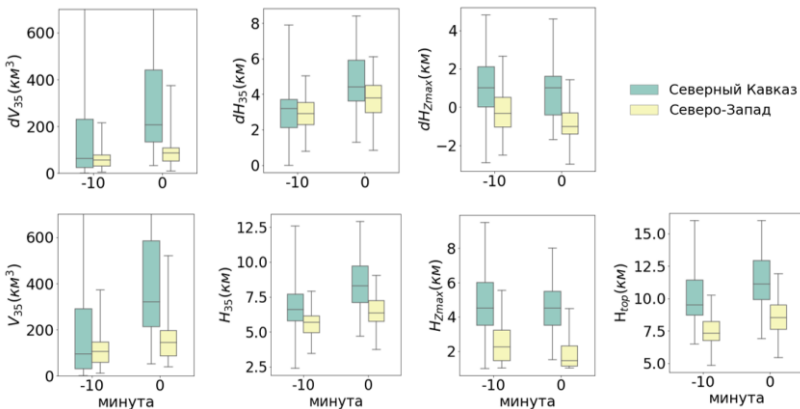


Рис. 1. Диаграмма сравнения выборок радиолокационных характеристик для двух сканов радиолокатора. 0 минута – скан, в котором зафиксированы разряды. «Ящик» определяет положение квантилей 25 и 75%, линия внутри ящика – медиана, «усы» обозначают минимальное и максимальное значение в выборке.

Исследования грозовых облаков в Индии показали, что облака оказываются очень мощными (верхняя граница может достигать 15 км и больше), при этом могут наблюдаться невысокие значения Z_{\max} . Общие закономерности перехода облаков в грозовую стадию аналогичны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант БРИКС_т 18-55-80020).

Литература

1. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods. Biometrics Bulletin, 1945, V. 1, P. 80–83.

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Л. И. Алексеева	39	Е. В. Завьялова	44
М. А. Алимпиева	44	Б. Г. Зайнетдинов	21
С. В. Анисимов	13, 88, 89, 103, 109	Д. В. Зайцева	80
Э. Асми	28	Г. В. Засько	37
А. А. Асташкин	27	В. И. Захаров	82
М. Аурела	23	С. С. Зилитинкевич	37
К. В. Афиногенов	13, 88, 103	В. В. Зуев	56
А. Ю. Баданов	70	А. А. Иванова	47
Г. Ф. Батраков	25	В. М. Ивахов	23
И. Б. Беликов	15	Н. В. Ильин	93, 98, 113
М. В. Беликович	68, 71, 86	Д. И. Иудин	115
В. А. Белоусов	15	М. А. Каллистратова	80
А. Ю. Богданович	17, 39	А. В. Карелин	10, 27
А. П. Бойко	72	З. М. Керефова	101
В. А. Болдырева	100	Н. Г. Клейменова	89
Д. В. Борисов	74	Е. В. Климанова	88, 103
И. В. Боровко	56	О. А. Коваль	64
Е. В. Булавина	19	Ф. А. Козлов	48
Е. С. Васильев	76	А. С. Козьмина	88, 105
А. А. Виноградова	6	Н. Ю. Колбнева	106
Н. Д. Волков	76	А. В. Колосов	108
Е. М. Володин	36, 45, 59	Т. С. Кошикова	50
В. В. Воробьева	45	Д. А. Кременчужский	25
А. С. Гаврилов	41, 84	А. А. Криволуцкий	66
С. В. Галиченко	13, 88, 90, 103, 109	В. Н. Крупчатников	56
А. С. Гинзбург,	6	Р. Д. Кузнецов	80
А. В. Глазунов	37	Д. Д. Кузнецов	80
М. Е. Горбунов	64	И. Н. Кузнецова	74
К. Ч. Гоуда	39	Ю. А. Кузьмин	27
А. С. Грицун	36, 38	М. Ю. Куликов	68, 71, 86
А. Н. Груздев	7	А. И. Купинская	32
А. В. Гурьев	13, 88	Ю. С. Куринная	25
С. О. Дементьева	98	В. Ю. Кустов	23
Э. М. Дмитриев	8, 105	И. П. Лавров	26, 29
А. А. Евтушенко	92	Е. А. Лапшин	27
Е. В. Егоров	32, 100	И. К. Ларин	12
Н. Ф. Еланский	17, 39, 82	Т. Лаурила	23, 28
Е. А. Енукова	39, 78	Е. А. Лезина	17
		В. А. Лобанов	51, 53
		М. А. Локощенко	17, 39, 72, 78

Е. М. Лоскутов	41, 84	С. А. Рябова	111
М. А. Лоскутова	23, 28	Е. С. Савельева	56
В. С. Люлюкин	80	Е. А. Сайгина	76
А. П. Макрушин	26, 29	Р. С. Салугашвили	58
А. П. Макштак	23, 28	Е. К. Свечникова	113
С. А. Маммедов	51	А. Ф. Селезнев	84
Е. А. Мареев	94, 98, 113	А. И. Скороход	15
С. А. Матвеев	27	Ю. И. Стожков	96
В. Г. Махмутов	96	А. А. Сысоев	115
Н. А. Мирсаева	47	М. А. Тарасевич	59
И. И. Морозов	76	М. А. Толстых	60
Е. В. Мортиков	37	М. Л. Торопова	116
И. И. Мохов	55	О. С. Угольников	69
Д. Н. Мухин	41, 84	Р. Ю. Фадеев	60
Ж. К. Наурузбаева	53	А. М. Фейгин	41, 68, 71, 84
М. Н. Нахаев	74	М. В. Филиппов	96
Ю. М. Нечепуренко	37	Л. В. Фоменко	72
Д. Р. Нигматуллин	76	В. М. Хан	60
И. Н. Павлов	30	А. В. Холопцев	25
И. Н. Панчишкина	32	А. А. Черкесов	101
Н. Н. Парамонова	23	А. В. Чернокульский	48
М. Р. Парфенова	55	А. Г. Чубаров	86
А. И. Петров	32	И. Ю. Шальгина	74
Г. Г. Петрова	100	В. В. Шашкин	60
Ю. А. Пластинин	27	А. В. Шевченко	32
Н. А. Пономарёв	82	Н. М. Шихова	89
В. Б. Попов	116	Ю. В. Шлюгаев	108
Т. С. Поповская	32, 100	В. А. Шувалов	10
А. А. Прохорчук	88, 109	Ю. И. Юсупов	70
К. Н. Пустовалов	50	В. П. Юшков	82
К. Г. Рубинштейн	70	А. А. Яковлев	10
Д. Ю. Румянцев	33	Н. Г. Яковлев	42

СОДЕРЖАНИЕ

НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ. АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ	5
<i>А.С. Гинзбург, А.А. Виноградова</i>	
Содержание кислорода и метана в городском воздухе в зависимости от климатических и метеорологических условий	6
<i>А.Н. Груздев</i>	
Изменения химического состава атмосферы на примере озона и двуокси азота	7
<i>Э.М. Дмитриев</i>	
Динамика радона в атмосферном приземном слое	8
<i>А.В. Карелин, В.А. Шувалов, А.А. Яковлев</i>	
Целевая аппаратура для мониторинга грозовой активности из космоса	10
<i>И.К. Ларин</i>	
О разрушении атмосферного озона в O_x , NO_x , NO_x , ClO_x , BrO_x и IO_x каталитических циклах	12
<i>К.В. Афиногенов, С.В. Галиченко, А.В. Гурьев, С.В. Анисимов</i>	
Датчик концентрации легких атмосферных ионов	13
<i>В.А. Белоусов, И.Б. Беликов, А.И. Скороход</i>	
Наблюдение турбулентных потоков газовых примесей атмосферы методом равномерного накопления микровихрей	15
<i>А.Ю. Богданович, М.А. Локощенко, Н.Ф. Еланский, Е.А. Лезина</i>	
Влияние стратификации по содарным данным на содержание атмосферных примесей	17
<i>Е.В. Булавина</i>	
Оценка уровня загрязнения взвешенными веществами снежного покрова г. Вологды	19
<i>Б.Г. Зайнетдинов</i>	
Суточные и сезонные вариации параметров атмосферного электричества в различных регионах РФ	21
<i>В.М. Ивахов, Н.Н. Парамонова, Т. Лаурила, М. Аурела, А.П. Макитас, В.Ю. Кустов, М.А. Лоскутова</i>	
Наблюдения приземной концентрации CO_2 и CH_4 на арктических станциях Росгидромета	23
<i>Д.А. Кременчуцкий, Г.Ф. Батраков, А.В. Холопцев, Ю.С. Куринная</i>	
Изменчивость концентрации радона-222 в приземном слое атмосферы севастопольского региона	25
<i>И.П. Лавров, А.П. Макрушин</i>	
Обработка и интерпретация геофизических данных по сети геомагнитных обсерваторий	26
<i>А.В. Карелин, А.А. Асташкин, Ю.А. Кузьмин, Ю.А. Пластинин, С.А. Матвеев, Е.А. Лапшин</i>	
О возможности мониторинга малых газовых примесей в атмосфере с помощью малых космических аппаратов	27

<i>М.А. Лоскутова, А.П. Макитас, Т. Лаурила, Э.Асми</i> Анализ измерений концентрации диоксида углерода в приземном слое на НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”» за 2015 – 2019 гг. _____	28
<i>И.П. Лавров, А.П. Макрушин</i> Особенности обработки спутниковых данных миссии MMS _____	29
<i>И.Н. Павлов</i> Характеристики многолетней изменчивости концентраций взвешенных веществ в атмосферном воздухе г. Вологды _____	30
<i>Т.С. Поповская, Е.В. Егоров, А.В. Шевченко, А.И. Купинская, И.Н. Панчишкина, А.И. Петров</i> Исследование спектра аэрозолей в степной и высокогорной зонах Северного Кавказа _____	32
<i>Д.Ю. Румянцев</i> Оценка сокращения уровня загрязнения атмосферы в Санкт-Петербурге в результате реализации мер по ограничению содержания серы в топливе морских судов на Балтике в рамках Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78) _____	33
МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ _____	35
<i>Е.М. Володин, А.С. Грицун</i> Моделирование климата настоящего, прошлого и будущего с помощью моделей климатической системы ИВМ РАН _____	36
<i>А.В. Глазунов, Е.В. Мортиков, Г.В. Засько, Ю.М. Нечепуренко, С.С. Зилитинкевич</i> Крупномасштабные структуры в устойчиво стратифицированных турбулентных течениях _____	37
<i>А.С. Грицун</i> Математические аспекты моделирования изменений климата _____	38
<i>М.А. Локощенко, Н.Ф. Еланский, Л.И. Алексева, Е.А. Енукова, А.Ю. Богданович, К.Ч. Гоуда</i> Климатические различия, опасные природные явления и «острова тепла» в крупнейших городах России и Индии _____	39
<i>А.М. Фейгин, Д.Н. Мухин, А.С. Гаврилов, Е.М. Лоскутов</i> Эмпирическое динамическое моделирование климата прошлого: реконструкция механизма изменения климата в среднем плейстоцене _____	41
<i>Н.Г. Яковлев</i> К пониманию динамики океана и морского льда Северного Ледовитого океана: Многомасштабная физика и вопросы численного моделирования _____	42
<i>М.А. Алимпиева, Е.В. Завьялова</i> Оценка вклада углекислого газа в наблюдаемый рост приповерхностной температуры воздуха _____	44
<i>В.В. Воробьева, Е.М. Володин</i> Анализ предсказуемости погоды на сезонном временном масштабе для климатической модели ИВМ РАН _____	45
<i>А.А. Иванова, Н.А. Мирсаева</i> Оценка биоклиматических условий Калининграда _____	47

<i>Ф.А. Козлов, А.В. Чернокульский</i>	
Изменчивость ливневых и обложных осадков на территории России по данным станционных наблюдений _____	48
<i>Т.С. Кошикова, К.Н. Пустовалов</i>	
Характеристики МКК на юге Западной Сибири _____	50
<i>С.А. Маммедов, В.А. Лобанов</i>	
Применение результатов климатических моделей для оценки проекций регионального климата _____	51
<i>Ж.К. Наурызбаева, В.А. Лобанов</i>	
Макроциркуляционные процессы и ледовые характеристики Каспия _____	53
<i>М.Р. Парфенова, И.И. Мохов</i>	
Внутрисезонная изменчивость приповерхностной температуры в полярных и субполярных регионах России _____	55
<i>Е.С. Савельева, В.В. Зуев, И.В. Боровко, В.Н. Крупчатников</i>	
Влияние нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря _____	56
<i>Р.С. Салугашвили</i>	
Глубина изотермического слоя океана и температура воздуха в Европе _____	58
<i>М.А. Тарасевич, Е.М. Володин</i>	
Исследование связи покрытия снегом Евразии осенью и аномалий динамики атмосферы последующей зимой по данным модели климата ИВМ РАН и реанализов _____	59
<i>М.А. Толстых, Р.Ю. Фадеев, В.В. Шашкин, В.М. Хан</i>	
Развитие системы долгосрочного прогнозирования на основе модели ПЛИАВ в Гидрометцентре России _____	60
ДИАГНОСТИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ	
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ _____	63
<i>М.Е. Горбунов, О.А. Коваль</i>	
Лучевые плотности Вигнера и Кирквуда и их применение для анализа радиозатменных данных _____	64
<i>А.А. Криволицкий</i>	
Трехмерное моделирование глобальных процессов в озоносфере и нижней ионосфере. Роль солнечной активности _____	66
<i>М.Ю. Куликов, М.В. Беликович, А.М. Фейгин</i>	
Восстановление распределений малых примесей мезосферы – нижней термосферы по данным спутникового зондирования SABER/TIMED _____	68
<i>О.С. Угольников</i>	
Средняя и верхняя атмосфера: проблемы, тренды, частицы _____	69
<i>А.Ю. Баданов, К.Г. Рубинштейн, Ю.И. Юсупов</i>	
Диагностика наличия глубокой конвекции с использованием спутниковых данных _____	70
<i>М.В. Беликович, М.Ю. Куликов, А.М. Фейгин</i>	
О возможности уточнения параметров модели свечения возбуждённого гидроксила по большим массивам спутниковых данных _____	71

<i>А.П. Бойко, М.А. Локощенко, Л.В. Фоменко</i>	
Турбулентная структура, стратификация и ветровой режим нижней тропосферы в Москве	72
<i>Д.В. Борисов, И.Ю. Шалыгина, И.Н. Кузнецова, М.Н. Нахаев</i>	
Уточнение эмиссий ЕМЕР для расчетов ХТМ CHIMERE на примере г. Москвы	74
<i>Н.Д. Волков, Д.Р. Нигматуллин, Е.А. Сайгина, Е.С. Васильев, И.И. Морозов</i>	
Реакция бензола с атомами галогенов	76
<i>Е.А. Енукова, М.А. Локощенко</i>	
Температурный режим лесопарков Москвы	78
<i>Д.В. Зайцева, М.А. Каллистратова, В.С. Люлюкин, Р.Д. Кузнецов, Д.Д. Кузнецов</i>	
Содарные исследования внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое и их влияния на обменные процессы	80
<i>Н.А. Пономарёв, Н.Ф. Еланский, В.П. Юшков, В.И. Захаров</i>	
Применение химико-транспортной модели SILAM для изучения состава приземного слоя атмосферы в Москве	82
<i>А.Ф. Селезнев, Д.Н. Мухин, А.С. Гаврилов, Е.М. Лоскутов, А.М. Фейгин</i>	
Новый метод построения динамических моделей по высокоразмерным данным	84
<i>А.Г. Чубаров, М.В. Беликович, М.Ю. Куликов</i>	
Построение аналитических критериев выполнения условия фотохимического равновесия малых примесей средней атмосферы	86
ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ.	
ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ	87
<i>С.В. Анисимов, С.В. Галиченко, К.В. Афиногенов, Е.В. Климанова, А.А. Прохорчук, А.С. Козьмина, А.В. Гурьев</i>	
Высотные аэроэлектрические профили среднеширотного атмосферного пограничного слоя	88
<i>С.В. Анисимов, Н.М. Шихова, Н.Г. Клейменова</i>	
Вариации аэроэлектрического поля над сушей средних широт во время глобальных геомагнитных возмущений	89
<i>С.В. Галиченко</i>	
Результаты численного моделирования электричества невозмущенного атмосферного пограничного слоя над морем и однородной поверхностью суши	90
<i>А.А. Евтушенко</i>	
Основные подходы при моделировании высотных разрядов	92
<i>Н.В. Ильин</i>	
Моделирование глобальной электрической цепи с помощью численных моделей динамики атмосферы	93
<i>Е.А. Мареев</i>	
Характеристики и модели формирования пиковых токов молниевых разряда	94
<i>Ю.И. Стожков, В.Г. Махмутов, М.В. Филиппов</i>	
Почему происходят молниевые разряды?	96
<i>С.О. Деметтьева, Н.В. Ильин, Е.А. Мареев</i>	
Влияние аэрозолей на эволюцию грозовых облаков на примере мощных конвективных событий на территории Нижегородской области	98

<i>Е.В. Егоров, Т.С. Поповская, В.А. Болдырева, Г.Г. Петрова</i> Вариации электрических характеристик приземного слоя в различных физико-географических условиях с учетом аэрозольного спектра _____	100
<i>З.М. Керефова, А.А. Черкесов</i> Исследование зависимости напряженности поля от солнечных вспышек _____	101
<i>Е.В. Климанова, С.В. Галиченко, К.В.Афиногенов, С.В. Анисимов</i> Высотные профили объемной активности радона, интенсивности ионообразования и электрической проводимости: результаты наблюдений и модельные оценки _____	103
<i>А.С. Козьмина, Э.М. Дмитриев</i> Суточная вариация объемной активности торона в приземной атмосфере _____	105
<i>Н.Ю. Колбнева</i> Дипольное электромагнитное излучение, генерируемое нелинейными осцилляциями заряженной капли в суперпозиции гравитационного и однородного электростатического полей _____	106
<i>А.В. Колосов, Ю.В. Шлюгаев</i> Пространственные распределения концентрации и электрического поля аэроионов, генерируемых при коронном разряде в приземном слое атмосферы _____	108
<i>А.А. Прохорчук, С.В. Галиченко, С.В. Анисимов</i> Ионная зарядка аэрозольных частиц в нижней атмосфере _____	109
<i>С.А. Рябова</i> Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитные бури _____	111
<i>Е.К. Свечникова, Н.В. Ильин, Е.А. Мареев</i> Метеоусловия ускорения энергичных частиц в облаке _____	113
<i>А.А. Сысоев, Д.И. Иудин</i> Моделирование процесса формирования пространственного стема на периферии стримерной короны отрицательного лидера молнии _____	115
<i>М.Л. Торопова, В.Б. Попов</i> Характеристики облаков, переходящих в грозовую стадию, по радиолокационным измерениям _____	116
УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ _____	118