

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

609

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук В. М. Катцова,
д-ра физ.-мат. наук В. П. Мелешко

Санкт-Петербург
2023

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
Телефон: (812) 297-43-90
ФАКС: (812) 297-86-61
e-mail: director@main.mgo.rssi.ru
web site: <http://www.voeikovmgo.ru>

Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова – научный рецензируемый журнал, публикующий результаты теоретических и экспериментальных исследований по актуальным проблемам изменения климата и прогноза погоды, атмосферной диффузии и мониторинга состояния атмосферы, климатологии, дистанционного зондирования атмосферы.

Журнал рассчитан на широкий круг научных работников и инженеров, интересующихся результатами современных исследований в области метеорологии и прикладной геофизики и их практическим использованием.

В соответствии с решением Президиума высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по специальностям: 1.6.18 – науки о Земле и климате.

Полное библиографическое описание всех статей журнала представлено в Научной электронной библиотеке elibrary.ru с целью формирования Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Электронные версии журнала доступны на сайте Научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru> и в разделе «Труды ГГО им. А.И.Воейкова» на сайте ГГО <http://voeikovmgo.ru>. Публикация в журнале бесплатная.

РЕДАКТОРЫ:

Катцов В.М., д-р физ.-мат. наук;

Мелешко В.П., д-р физ.-мат. наук, заслуженный деятель науки РФ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Е. М. Акентьева, канд. геогр. наук, С. Ю. Гаврилова, канд. геогр. наук,

Е. Л. Генихович, д-р физ.-мат. наук, А. С. Грицун, д-р физ.-мат. наук,

С. К. Гулев чл. корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, А. С. Зайцев, канд. физ.-мат. наук,

В. И. Кириллова, канд. геогр. наук, А. А. Киселев, канд. физ.-мат. наук,

Е. Л. Махоткина, канд. геогр. наук, секретарь редколлегии,

В. Н. Морозов, д-р физ.-мат. наук, Т. В. Павлова, канд. физ.-мат. наук,

Г. Б. Пигольцина, д-р геогр. наук, Е. В. Розанов, канд. физ.-мат. наук,

А. А. Синькевич, д-р техн. наук, И. В. Смирнова, канд. геогр. наук,

А. П. Соколов, канд. физ.-мат. наук, П. В. Спорышев, канд. физ.-мат. наук,

И. А. Тарабукин, канд. физ.-мат. наук, Е. И. Хлебникова, канд. физ.-мат. наук,

С. С. Чичерин, канд. физ.-мат. наук, И. М. Школьник, канд. физ.-мат. наук.

ISSN 0376-1274

© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова»
2023

Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory is a peer-reviewed scientific journal publishing the results of theoretical and experimental research on current issues of climate change and weather forecasting, atmospheric diffusion and atmospheric monitoring, climatology, remote sensing of the atmosphere.

The journal is intended for a wide range of scientists and engineers interested in the results of modern research in the field of meteorology and applied geophysics and their practical application.

The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results of dissertations for Ph. D. (the scientific degree of candidate and doctor of science) on Earth and climate sciences should be published.

A complete bibliographic description of all articles in the journal is presented in the Scientific Electronic Library elibrary.ru with the aim of forming the Russian Science Citation Index (RSCI).

Electronic versions of publications are available on the website of the Scientific Electronic Library <http://elibrary.ru> and in the section "Proceedings of the Voeikov MGO" on the MGO website <http://voeikovmgo.ru>. Publication in the journal is free.

EDITORS:

Dr. V. M. Kattsov;

Dr. V. P. Meleshko, Honored Scientist of the Russian Federation.

Editorial board

Dr. E. M. Akentyeva, Dr. S. Yu. Gavrilova Dr. E. L. Genihovich,
Dr. A. S. Gritsun, Dr. S. K. Gulev, Dr. A. S. Zaitsev, Dr. V. I. Kirillova, Dr. A. A. Kiselev,
Dr. E. L. Makhotkina (Editorial board secretary), Dr. V. N. Morozov, Dr. T. V. Pavlova,
Dr. G. B. Pigoltsina, Dr. E. V. Rozanov, Dr. A. A. Sinkevich, Dr. I. V. Smirnova,
Dr. A. P. Sokolov, Dr. P. V. Sporyshev, I. A. Tarabukin, Dr. E.I. Khlebnikova,
Dr. S. S. Chicherin, Dr. I. M. Shkolnik.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Е. М. Акентьева, М. В. Клюева, Д. В. Фасолько, Е. П. Самойлова, Е. Н. Разова.</i> Специализированная климатическая информация для подготовки региональных планов адаптации к изменению и изменчивости климата (на примере Ленинградской области).	8
<i>Е. Л. Генихович, Д. Ю. Румянцев.</i> Корректировка аналитического решения уравнения атмосферной диффузии, предложенного А. С. Мониным.	30
<i>И. А. Тарабукин, Е. В. Дорофеев, М. В. Львова, Ю. П. Михайловский, О. А. Дмитриева, Е. Я. Богомазова, А. С. Горбатовская, П. Ю. Кузьменко.</i> О развитии методов штормового оповещения в Северо-Западном регионе на основе разнородной геофизической информации с привлечением алгоритмов машинного обучения.	48
<i>А. А. Синькевич, М. Л. Торопова, Н. Е. Веремей, Ю. П. Михайловский, А. Б. Куров, И. А. Тарабукин</i> Градовые облака Северо-Запада Российской Федерации.	64
<i>А. В. Снегуров, В. С. Снегуров.</i> Результаты сравнения данных ДМРЛ и грозопеленгационных систем.	78
<i>А. Н. Махоткин, Е. Л. Махоткина, И. Н. Плахина.</i> Прозрачность атмосферы на территории России: текущие изменения в XXI в.	103
<i>М. Ч. Залиханов, Б. М. Хучунаев, С. О. Геккиева, А. Х. Будаев.</i> Экспериментальные исследования льдообразующих свойств кластеров из нанотрубок оксида алюминия.	120
<i>М. Ч. Залиханов, А. Х. Кагермазов, Л. Т. Созаева.</i> Результаты апробации прогноза града по выходным данным глобальной модели атмосферы в зоне ответственности Северо-Кавказской военизированный службы.	132

<i>В. С. Инюхин, Е. А. Чередник.</i> Результаты районирования территории Кабардино-Балкарии по интенсивности и частоте градобитий.	144
<i>К. Б. Лиев, С. А. Куцев.</i> Град в центральной части Северного Кавказа.	156
<i>М. Ч. Залиханов, Л. Т. Созаева.</i> Обратное рассеяние радиоволн от столбчатых облачных кристаллов.	165
<i>Р. Х. Зекореев.</i> Влияние аэрозольного загрязнения атмосферы на напряженность электрического поля в районе карьера открытых горных разработок.	176
<i>А. Х. Аджиев, А. А. Черкесов.</i> Роль солнечной активности в суточной динамике электрического поля приземной атмосферы.	185

CONTENTS

<i>Akentyeva E. M., Klueva M. V., Faselko D. V., Samoylova E. P., Razova E. N.</i> Tailored climate information for the preparation of regional adaptation plans to climate change and variability (on the example of the Leningrad region.	7
<i>Genikhovich E. L., Rumyantsev D. Yu.</i> Correction of the analytical solution of the equation of atmospheric diffusion derived by A.S. Monin.	30
<i>Tarabukin I. A., Dorofeev E. V., Lvova M. V., Mikhailovsky Yu. P., Dmitrieva O. A., Bogomazova E. Ya., Gorbатовskaya A. S., Kuzmenko P. Yu.</i> About the development of storm warning methods in the Northwest region based on heterogeneous geophysical information involving machine learning algorithms.	48
<i>Sin'kevich A. A., Toropova M. L., Veremei N. E., Mikhailovskii Yu. P., Kurov A. B., Tarabukin I. A.</i> Hail clouds in the north-west of the Russian Federation.	64
<i>Snegurov A. V., Snegurov V. S.</i> Results of comparison of DMRL data and lightning detection systems.	78
<i>Makhotkin A. N., Makhotkina E. L., Plakhina I. N.</i> The transparency of the atmosphere in Russia: current changes in the XXI century.	103
<i>Zalikhhanov M. Ch., Khuchunaev B. M., Gekkieva S. O., Budaev A. Kh.</i> Experimental studies of ice-forming properties of aluminum oxide nanotube clusters.	120
<i>Zalikhhanov M. Ch., Kagermazov A. Kh., Sozaeva L. T.</i> The results of testing the hail forecast based on the output data of the global atmospheric model in the area of responsibility of the North-Caucasus Special Service on Weather Modification.	132

<i>Inyukhin V. S., Cherednik E. A.</i> Results of zoning the territory of Kabardino-Balkaria according to the intensity and frequency of hailstorms.	144
<i>Liev K. B., Kushchev S. A.</i> Hail in the central part of the North Caucasus.	156
<i>Zalikhhanov M. Ch., Sozaeva L. T.</i> Backscattering of radio waves from columnar cloud crystals.	165
<i>Zekoreev R. Kh.</i> Influence of aerosol pollution of the atmosphere on the electric field strength in the area of open pit mining	176
<i>Adzhiev A. Kh., Cherkesov A. A.</i> The role of solar activity in the daily dynamics of the electric field of the surface atmosphere. ..	185

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ
ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ РЕГИОНАЛЬНЫХ
ПЛАНОВ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЮ И ИЗМЕНЧИВОСТИ
КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

*Е. М. Акентьева, М. В. Клюева, Д. В. Фасолько,
Е.П. Самойлова, Е.Н. Разова*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: eakentyeva@mail.ru

Поступила в редакцию 3.09.2023

Поступила после доработки 16.10.2023

Введение

Российская система адаптации к изменениям климата начала формироваться с 2019 года, когда был принят Национальный план адаптации (Распоряжение правительства РФ №3183-р), который позволил подготовить необходимую правовую и методическую базу и разработать планы адаптации в отраслевых и территориальных разрезах. В 2022 г. правительством Российской Федерации был утвержден Важнейший инновационный проект государственного значения (ВИПГЗ) (Распоряжение правительства РФ №3240-р), направленный на экологическую (низкоуглеродную) трансформацию отраслей экономики и адаптацию экономики и населения к изменениям климата.

Для разработки оптимальных адаптационных мер и оценки климатических рисков в регионах России в рамках Национального плана и ВИПГЗ выполняется оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений климатических характеристик, оказывающих воздействие

на различные отрасли экономики. Определяется перечень климатически уязвимых объектов, которые позволяют выделять конкретные элементы инфраструктуры с учетом возможных климатических воздействий, характерных для данной территории.

Учет климатической информации становится обязательным при формировании региональных планов адаптации к изменению климата. Оценка погодно-климатических рисков для основных отраслей социально-экономической сферы данного субъекта выполняется с использованием базовой и специализированной климатической информации, получаемой по данным наблюдений и результатам сценарного прогнозирования.

Цель настоящего исследования — изучение на примере территории Ленинградской области подходов к решению задач, которые в дальнейшем целесообразно использовать при разработке региональных планов адаптации к изменению климата.

Подготовка специализированной климатической информации

Используемая для разработки плана адаптации региона система специализированных климатических показателей — это набор статистических параметров метеорологических величин. При преобразовании метеорологических данных в климатическую информацию следует использовать подходы, изложенные в руководстве по климатологической практике ВМО (Руководство, 2018) и отечественных руководствах по методам обработки специализированных климатических показателей (Кобышева, 1990; Методические рекомендации, 2017, 2022; Руководство, 2008).

Для получения специализированных климатических характеристик использовались данные метеорологических наблюдений на станциях и постах Ленинградской области за период 1966–2021 гг. Проверка однородности рядов была выполнена в соответствии с принятой международной практикой (Руководство, 2018).

Прогнозные оценки получены на основе ансамблевых расчетов с помощью системы моделей глобального и регионального климата Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (РКМ ГГО)

(Катцов и др., 2016). Используются результаты численных экспериментов по моделированию климата при задании сценария антропогенного воздействия МГЭИК RCP8.5 (Van Vuuren et al, 2011) для двух периодов в XXI веке (2050–2059 гг. и 2090–2099 гг.). В качестве базового периода выбрано десятилетие 1990–1999 гг. Горизонтальное разрешение глобальной и региональной моделей составляет, соответственно, 200 и 25 км. Для оценки неопределенности будущих изменений характеристик, обусловленной внутри ансамблевым разбросом вследствие естественной изменчивости климатической системы, используется отношение сигнала к шуму: отношение среднего по ансамблю изменения характеристики к стандартному отклонению изменений в ансамбле.

Строительство

Оценка влияния климата на строительство предполагает учет его воздействия на планирование, проектирование и эксплуатацию строительного объекта. От корректности учета этого влияния зависит выбор места застройки, архитектурно-планировочные решения объектов строительства, комфортность условий работы или проживания человека, длительность эксплуатации сооружений.

Основным расчетным климатическим параметром при проектировании ограждающих конструкций является число градусо-суток отопительного периода (ГСОП). Уменьшение ГСОП является положительным следствием происходящего потепления, которое повышает тепловую эффективность существующих зданий. Сравнение параметров отопительного периода за 1961–1990 и 1991–2020 гг. показало, что на территории Ленинградской области продолжительность отопительного периода уменьшилась от 8–9 дней в северо-западных и центральных районах области до 4–7 на остальной территории. Температура отопительного периода во всех муниципальных районах выросла на 1–1,3°C, что на 5–10 % сократило число градусо-суток (табл. 1).

Таблица 1

Параметры отопительного периода за 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг.

Станция	1991–2020 гг.		1961–1990 гг.			
	Продолжительность ОП, дни	Температура, °С	ГСОП, °С·сут.	Продолжительность ОП, дни	Температура, °С	ГСОП, °С·сут.
Белогорка	217	-1,5	4228	223	-2,6	4595
Винницы	227	-2,7	4699	234	-3,7	5078
Выборг	216	-1,3	4172	223	-2,5	4563
Ефимовская	224	-2,7	4637	231	-3,7	5009
Кингисепп	209	-0,7	3901	217	-2,0	4330
Лесогорский	223	-1,5	4339	229	-2,6	4717
Лодейное	222	-2,6	4568	226	-3,5	4867
Поле	211	-1,0	4012	217	-2,3	4396
Николаевское	216	-0,8	4070	221	-2,0	4431
Озерки	221	-1,4	4276	230	-2,5	4704
Сосново	218	-2,0	4364	225	-3,2	4763
Тихвин	215	-1,2	4127	224	-2,3	4555

Рост термических показателей благоприятно сказывается и на затратах на возведение фундаментов зданий. Глубина заложения фундамента принимается с учетом либо глубины сезонного промерзания грунта, рассчитанной как средняя из ежегодных максимальных глубин промерзания грунта, либо по косвенному показателю, зависящему от температуры воздуха (нормативное промерзание). В последние тридцать лет наблюдается уменьшение нормативной глубины промерзания грунта по сравнению с периодом 1961–1990 гг. от 12 % на востоке области до 20 % на юго-западе.

На организацию и проведение строительных работ изменение климата влияет неоднозначно. Характерное для территории Ленинградской области сокращение числа дней с температурой воздуха ниже -5°C и уменьшение длительности периода с отрицательной температурой воздуха улучшает условия для проведения работ и увеличивает продолжительность строительного сезона. При этом увеличение интенсивности и частоты экстремальных осадков (рис. 1) приводит к удорожанию строительных работ из-за необходимости создания временных сооружений защиты от затоплений.

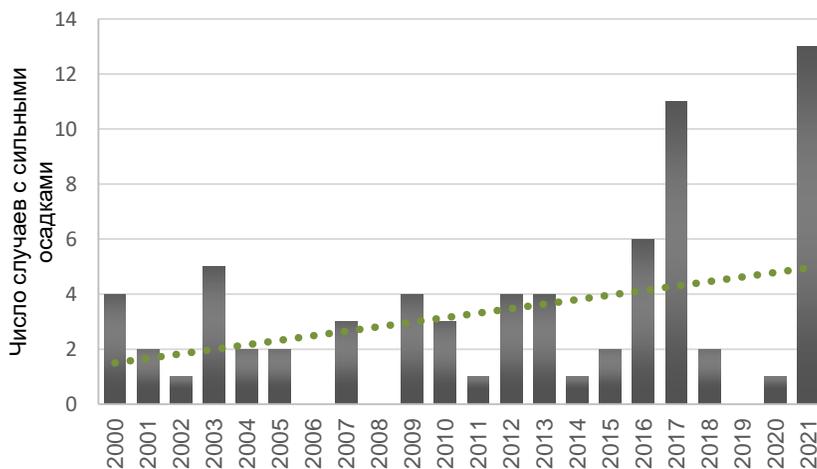


Рис. 1. Изменения годового числа случаев с сильными осадками за период 2000–2021 гг.

Важнейшими характеристиками любого строения являются его долговечность и ремонтпригодность. В соответствии с регламентирующими документами (СП 28.13330.2012) долговечность ограждающих конструкций зданий и сооружений определяется сроком их службы без потери эксплуатационных качеств и обеспечивается применением материалов, имеющих надлежащую морозо-, влаго-, биостойкость, а также стойкость против коррозии, высокой температуры, циклических температурных колебаний и других разрушающих воздействий окружающей среды.

Наиболее распространенным видом разрушающего воздействия являются температурно-влажностные деформации. В последние десятилетия в условиях происходящего потепления на территории Ленинградской области наблюдается тенденция к ускоренному старению и уменьшению долговечности ограждающих конструкций зданий. Разрушение ограждающих конструкций происходит особенно интенсивно при быстрой смене температур и особенно при переходах температуры через 0°C .

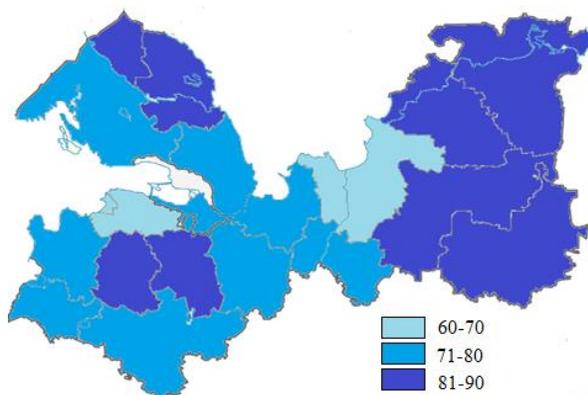


Рис. 2. Среднее годовое число дней с переходом через 0°C в 1966–2021 гг.

В Ленинградской области число дней с переходом через 0°C составляет от 60–70 дней в Ломоносовском и Волховском районах до 80–90 дней в Приозерском районе, в восточных районах области

и на Ижорской возвышенности (Волосовский и Гатчинский муниципальные районы) (рис. 2). Такая климатическая нагрузка исключительно высока для любых строительных материалов.

Колебания отрицательной температуры наружного воздуха приводят к изменению положения нулевой температурной точки в толще стены, а многократное замораживание и оттаивание материала, способствуют его постепенному разрушению. Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества осадков в зимний период, в особенности, жидких и смешанных, сопровождающих оттепели.

Одна из очевидных причин повреждения зданий — протечка кровли. Сильные протечки связаны, прежде всего, с нарушением температурно-влажностного режима чердаков. На территории Ленинградской области в весенний период, когда относительная влажность воздуха превышает 90 %, а температура воздуха колеблется около 0 °С, теплый воздух, поднимающийся к коньку крыши, повышает температуру верхней части кровли на 2–4°С, и этого достаточно для того, чтобы вызвать интенсивное таяние снега. Стекающая вниз вода, попадает на холодную часть кровли и превращается в лед, который забивает водосточные трубы, стыки стены здания с прилегающим к нему кровельным покрытием и т. п. Количество дней, отвечающее перечисленным выше условиям, составляет от 25 на востоке до 30–35 на севере области.

Еще одна причина разрушения крыш — снеговые нагрузки, особенно при попадании большого количества жидких осадков на крыши, покрытые снегом, что многократно увеличивает вес снежного покрова и создает опасность обрушения кровли. В условиях изменений климата, когда наблюдается увеличение интенсивности зимних осадков, особое значение для объектов строительства приобретают кратковременные снеговые нагрузки, возникающие при сильных снегопадах. Ожидаемые изменения климата, характеризующиеся усилением этой тенденции, являются дополнительным фактором риска для зданий и сооружений (Третий оценочный доклад, 2022).

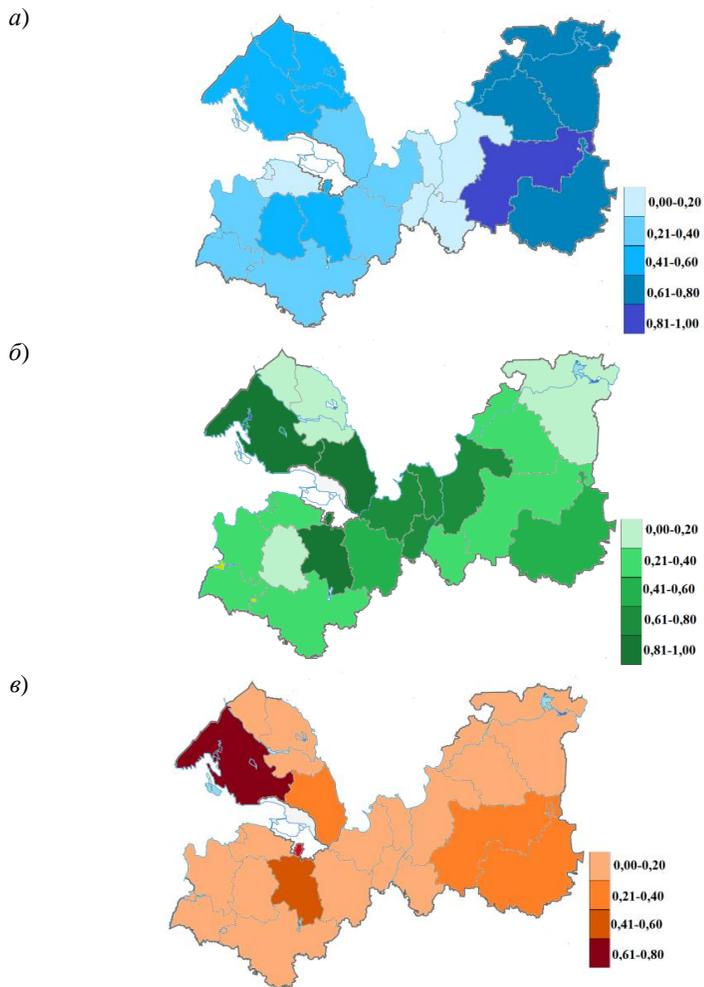


Рис. 3. Нормированные значения составляющих погодно-климатического риска для долговечности зданий выраженные в относительных единицах: климатические угрозы (а), уязвимость зданий (б), погодно-климатический риск (в)

Для определения степени погоднo-климатического риска для долговечности зданий на территории Ленинградской области проведена оценка климатических угроз и уязвимости для отдельных административных районов. Расчет риска проводился в соответствии с методикой, изложенной в монографии Н. В. Кобышевой с соавторами (2015). Для оценки влияния климатических параметров были получены средневзвешенные значения параметров, неблагоприятно влияющих на долговечность зданий: повторяемость оттепелей, от которой прежде всего зависит целостность ограждающих конструкций; характеристики «увлажненности» стен здания (суммы осадков за теплый период, число дней с переходом через 0°C и запас воды в снеге). Анализ полученных результатов показал, что наиболее неблагоприятные климатические условия с точки зрения сокращения долговечности здания наблюдаются на востоке области (рис. 3а).

Для оценки уязвимости долговечности зданий использована информация сайта DomReestr.ru о количестве домов в городах и городских поселениях муниципальных районов Ленинградской области. Для сравнимости данных были выбраны дома единого типа, так называемые панельные «хрущевки», как строения, наиболее уязвимые к климатическим воздействиям. Как видно на рис. 3б, уязвимость строительных конструкций наиболее значительна в районах с достаточно высокой плотностью населения.

В результате было определено, что наибольшие относительные значения риска характерны для Выборгского административного района, где довольно много зданий указанного типа и достаточно неблагоприятные климатические условия (рис. 3в).

Транспорт

Ленинградская область, по территории которой проходят 5 федеральных трасс, является крупным транспортно-логистическим узлом Российской Федерации, где пересекаются сухопутные, водные и воздушные пути, являющиеся международными транспортными коридорами. Общая протяженность автомобильных дорог превышает 22 500, железных дорог — 3640 км.

Объекты транспортной инфраструктуры более чувствительны к экстремальным явлениям, чем к постепенным изменениям климатических параметров (Velegrakis, 2013). Поэтому опасные явления погоды (ОЯ) являются значимым климатическим фактором риска для транспортного сектора. За период 2000–2021 гг. на 38 метеостанциях и метеопостах на территории Ленинградской области зафиксирован 151 случай природных явлений, которые достигли критериев опасных явлений, установленных Росгидрометом (РД 52.04.563-2002).

Наибольшая повторяемость ОЯ (рис. 4а) характерна для Выборгского района, где основной вклад вносят сильные туманы и ветры, и Лодейнопольского района, для которого характерна большая повторяемость сильных морозов. В остальных районах наиболее часто повторяются ОЯ, обусловленные сильными ливнями и продолжительными дождями.

В качестве показателей уязвимости транспортного сектора к погодно-климатическим рискам были использованы сведения о плотности автодорог, степени их изношенности, а также плотности населения в муниципальных образованиях Ленинградской области. Наибольшая плотность автодорог характерна для районов, прилегающих к Санкт-Петербургу — Ломоносовский, Кировский, Волосовский, Тосненский, Всеволожский, Выборгский, где плотность автодорог (включая федеральные трассы, дороги регионального и муниципального значения) находится в пределах 326...515 км на 1000 км², что в несколько раз выше, чем в удаленных от Санкт-Петербурга областях (например, в Подпорожской области плотность автодорог составляет 105,7 км/1000 км²). Плотность населения так же значительно различается от района к району. Наиболее населенные районы — Всеволожский, Гатчинский, Ломоносовский, где плотность варьируется от 74,2 до 166,7 чел./км², а наименее населенный район — Подпорожский, Лодейнопольский, Бокситогорский, где плотность населения составляет от 3,4 до 6,6 чел./ км².

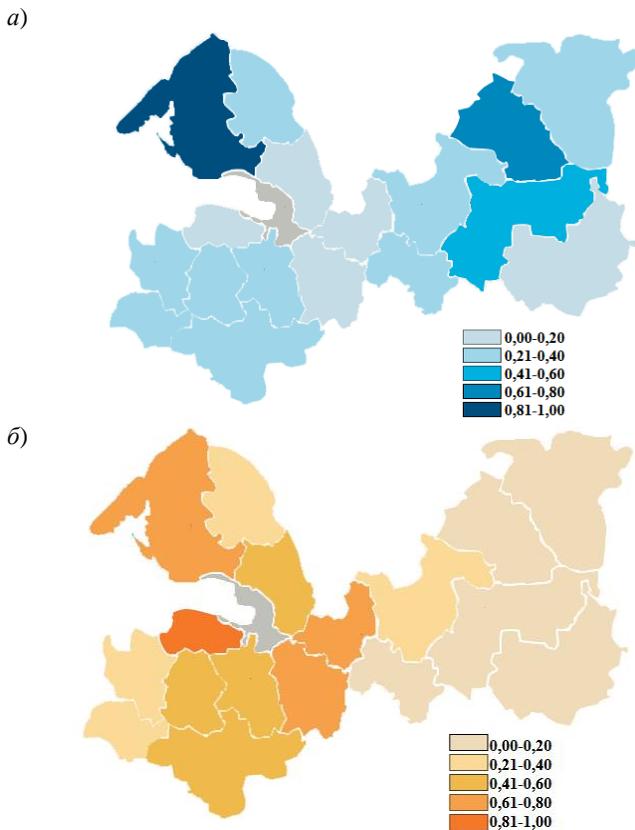


Рис. 4. Повторяемость опасных метеорологических явлений в муниципальных образованиях Ленинградской области (а) и уязвимость автодорожной транспортной системы (б), выраженные в относительных единицах

Существует много показателей транспортной обеспеченности территории, среди которых коэффициент Гольца, Энгеля, густота транспортных сетей на 1000 км и 10000 жителей. Все эти индексы в том или ином виде включают в себя протяженность транспортных путей, площадь территории и численность населения (Лебедева, 2021).

Поскольку в рассматриваемом регионе распределение плотности населения и автодорог имеют схожий характер (чем ближе к Санкт-Петербургу, тем плотность выше), то для оценки уязвимости транспортной системы достаточно рассмотреть показатель плотности автодорог на 1000 км². Наиболее уязвимыми районами оказываются Ломоносовский, Выборгский, Гатчинский и Кировский, имеющие наиболее густую транспортную сеть (рис. 4б).

В общем виде погодно-климатический риск R был рассчитан в соответствии с (Кобышева и др., 2015). Наибольшие значения погодно-климатического риска от ОЯ (рис. 5) характерны для Выборгского района за счет развитой транспортной инфраструктуры и наибольшей повторяемости ОЯ; наименьшие значения отмечаются в Бокситогорском, Киришском и Подпорожском районах за счет низкой плотности автомобильных дорог и в Тосненском районе из-за малой повторяемости ОЯ.

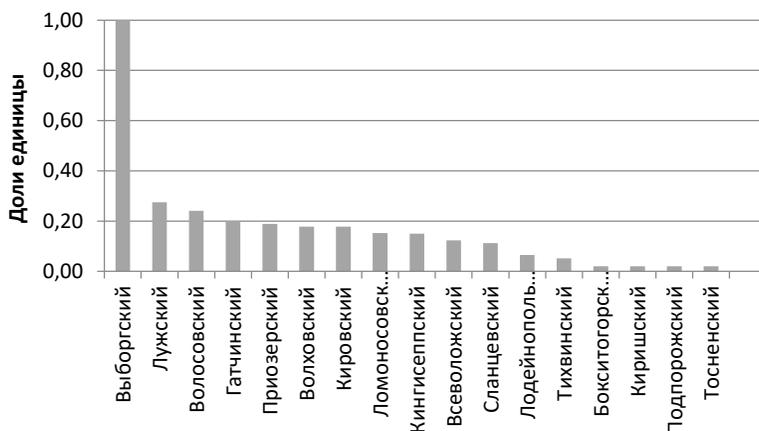


Рис 5. Погодно-климатический риск для транспортной отрасли от ОЯ в административных районах Ленинградской области (доли единицы)

Для выявления областей, наиболее подверженных климатическим рискам необходимо так же оценить динамику изменения климатических характеристик, которые могут приводить к расходам

по устранению последствий нарушений работы транспортной инфраструктуры. Например, для эксплуатации железнодорожных путей (особенно бесстыковых) большое значение имеют высокие температуры воздуха, которые могут приводить к ограничению скорости поезда и сбоям в расписании. Наибольшее число дней с аномально жаркой погодой, когда в течение 5 дней и более значение среднесуточной температуры воздуха выше климатической нормы на 7°С и более, отмечается в Волховском, Тихвинском, Киришском, Лодейнопольском и Выборгском районах. Все случаи с таким явлением отмечались после 1998 г.

Большое значение для транспортной инфраструктуры играет изменение режима осадков. Интенсивные продолжительные осадки, ливни и связанные с ними паводки вызывают затопление дорог, нарушение структурной целостности дорожного полотна, затрудняют ремонтно-техническое обслуживание дорог, увеличивают риск возникновения аварийных ситуаций.

На территории Ленинградской области наблюдается рост числа случаев с сильными ливнями и дождями (рис. 1) В 2021 г. было зафиксировано 13 случаев выпадения сильных осадков, из них по 3 случая — в Тихвинском и Бокситогорском муниципальных районах. Изменился и расчетный суточный максимум осадков различной обеспеченности. С учетом данных последних лет суточный максимум осадков 1 % обеспеченности вырос в пределах 7–11 % на метеостанциях Тихвин, Лодейное Поле, Кингисепп.

Здоровье населения

Ряд особенностей физико-географического положения Ленинградской области, прежде всего, значительная зональная протяженность, неоднородность подстилающей поверхности и наличие крупных водоемов (Финский залив, Ладожское и Онежское озера), обуславливает разнообразие климатических условий и формирует неоднородность территории по комфортности проживания, создает дополнительные риски возникновения сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) в отдельных административных районах области.

В качестве биоклиматических стрессоров для ССЗ обычно рассматриваются такие показатели, как биотропность (дискомфортность) территории, межсуточные перепады температуры воздуха и атмосферного давления, волны тепла и холода.

Для оценки степени дискомфорта территории используется комплексный биоклиматический индекс эквивалентно-эффективной температуры (ЕТ), который связан со смертностью от ишемической болезни сердца в возрастной группе людей старше 60 лет (Ткачук и др., 2012; Унтилов, 2006; Li et al, 2000). Комплексное влияние температуры, влажности воздуха и скорости ветра в зимний период создает на территории области две зоны выраженного субкомфорта с холодной и очень холодной погодой. На территории Ленинградской области наиболее неблагоприятные условия характерны для северных (Выборгский) и восточных (Лодейнопольский, Подпорожский и Бокситогорский) районов, расположенных на территории Вепсовской возвышенности и Тихвинской гряды. Число дней с категорией биотропности погоды «резкая» составляет от 30 дней на западном побережье Ладожского озера до 75 дней в восточных районах области, а с «чрезмерно резкой» — от 10 дней на юго-западных побережьях Финского залива до 3 недель на востоке области. Таким образом, дискомфорт высокой степени биотропности, усугубляющийся коротким световым днем, население этих регионов испытывает на месяц дольше, чем жители центральных, южных и западных районов. Летом на территории Ленинградской области наблюдаются благоприятные климатические условия.

Межсуточные колебания температуры воздуха и атмосферного давления — еще один фактор, влияющий на сердечно-сосудистую систему. Ключевыми факторами воздействия здесь выступают большие (более 6 °С) изменения температуры воздуха и атмосферного давления (более 10 гПа) в течение 24–48 часов (Золотокрылин и др., 2018). Наиболее значительными межсуточными перепадами температуры воздуха в годовом ходе характеризуется зимний период. Повторяемость межсуточных колебаний температуры более 6 °С различается в зависимости от района: на севере и юге Ленинградской области число дней с межсуточным изменением более 6 °С составляет

7, а в восточных районах достигает 16 % относительно длительности зимнего сезона. Экстремальные значения межсуточных колебаний температуры находятся в диапазоне значений 20–25 °С. При этом на севере области большие значения отмечаются при подъеме температуры воздуха, что соответствует гипоксическому типу погоды, крайне неблагоприятному для людей с гипертонической болезнью. Межсуточные изменения атмосферного давления в зимний период также вызывают значительный рост числа госпитализаций и повышение смертности от ССЗ. Для территории Ленинградской области зимой характерны средние перепады давления около 6 гПа, а локальные максимумы варьируют от 47 (Выборг) до 33 гПа (восточные районы области).

Среди климатических характеристик, влияющих на ССЗ, особого внимания заслуживают волны тепла (холода). Результаты исследования, показали, что прирост естественной смертности при прохождении волн тепла и холода происходит в основном из-за увеличения смертности от сердечно-сосудистых заболеваний (Ревич и др., 2019). Волны холода рассчитывались для зимнего сезона как непрерывный период (не менее 5 суток) со средней суточной температурой воздуха ниже процентиля 0,03 многолетнего распределения, включающий не менее 3 суток с температурой ниже процентиля 0,01 (Ревич и др., 2011). Для территории Ленинградской области температура, соответствующая первой процентилю для зимнего сезона, варьирует от –16,0 °С в Кингисеппском, Лужском и Выборгском районах до –19,1 °С на востоке (соответствующие значения процентиля 0,01 колеблются от –17,2 до –23,0 °С). Пространственная изменчивость повторяемости волн холода зимой на территории области незначительная, так как вторжения холодного воздуха обусловлены в этот период года крупномасштабной атмосферной циркуляцией.

Что касается волн тепла, то с начала XXI в. в Ленинградской области наблюдается устойчивый рост их повторяемости летом. На территории Ленинградской области в 1984–2018 гг. волны тепла в среднем наблюдались с повторяемостью 0,3 за весь период, но если до 1999 г. вероятность их наступления была 10 %, то в последующие

годы составила 50 %. Таким образом, волны тепла, отмечаемые один раз в 10 лет, после 1999 г. стали наблюдаться в среднем в 5 раз чаще.

Для разработки мер борьбы с высоким уровнем смертности от ССЗ на территории области, целесообразно использовать стратегическое районирование по степени влияния климата на уровень ССЗ. Для выявления территориальных различий в Ленинградской области используются результаты расчетов для основных выбранных стрессоров, к которым относятся число дней с ЕТ с индексом биотропности выше 0,8 («очень холодная погода»), среднее число дней с межсуточным изменением температуры более 6 °С, средняя продолжительности периодов с температурой ниже процентиля 0,03 и минимальная средняя суточная температура в волне холода. В данном исследовании использовались стрессоры только холодного периода, так как показатели теплого времени года распределяются по территории сравнительно равномерно и не несут существенной дополнительной информации, необходимой для районирования территории.

Для районирования территории Ленинградской области по величине климатических стрессоров для ССЗ использовался кластерный анализ, задача которого — разбиение заданной выборки объектов на подмножества (кластеры) так, чтобы каждый кластер состоял из схожих объектов, а объекты разных кластеров существенно отличались.

Было определено, что с высокой степенью различия выделяются два неравномерных кластера: восточный, включающий Лодейнопольский, Подпорожский, Бокситогорский и Тихвинский районы (III) и вся остальная часть области (рис. 6а). В свою очередь для второй группы характерно присутствие районов со средней степенью различия. Наиболее комфортную группу с точки зрения влияния климата на ССЗ составляют Киришский, Кировский, Выборгский и Лужский муниципальные районы (I). Промежуточное положение занимают Всеволожский и Кировский районы.

Далее выделяется группа районов, где показатели стрессоров незначительно отличаются от показателей районов первой группы,

но с точки зрения комфортности и безопасности в целом по всем показателям хуже, чем в районах первой группы (II).

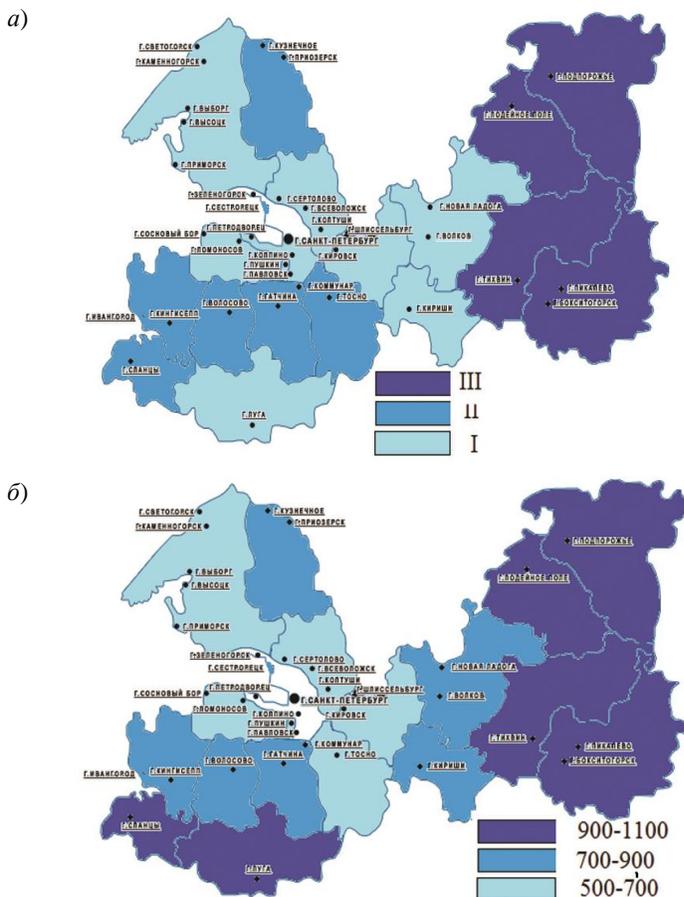


Рис. 6. Районирование территории Ленинградской области по степени неоднородности влияния климатических воздействий на сердечно-сосудистые заболевания (а) и средний показатель смертности на 100000 человек от болезней системы кровообращения (б) за период 2011–2018 гг.

Восточный кластер характеризуется наиболее неблагоприятными климатическими показателями, влияющими на уровень заболеваемости и смертности от ССЗ.

Сравнение коэффициента смертности от сердечно-сосудистых заболеваний показывает, что пространственные особенности климатических воздействий и уровня смертности в целом удовлетворительно согласуются. Безусловно, распределение коэффициента смертности от ССЗ по территории области во многом зависит от демографических показателей муниципальных районов. Он наиболее высок в районах с большой демографической нагрузкой и высоким процентом людей старше 65 лет. Поэтому на рисунке 6б выделяются два района (Сланцевский и Лужский) с относительно благоприятным климатом. Однако, как показал регрессионный анализ, если в южных районах не были обнаружены значимые связи коэффициента смертности с выбранными климатическими показателями, то в восточном кластере все связи достоверны на уровне 0,1, а с показателями биотропности и перепадов атмосферного давления — на уровне 0,05.

Сценарные прогнозы изменений климата для середины и конца XXI в., рассчитанные по РКМ ГГО, указывают, преимущественно, на сохранение (а в ряде районов – и на усиление) в будущем тенденций, которые обнаруживаются по данным наблюдений. Вероятно, что по сравнению с современным климатом уже к середине столетия на территории области не останется районов с категорией биотропности «очень холодная погода». При этом различия между восточной и западной частями области по показателю холодового дискомфорта будут сглаживаться. К концу XXI в. уровень холодового восприятия повысится до «умеренного».

В будущем, на фоне прогнозируемого снижения изменчивости температуры воздуха, ожидается уменьшение повторяемости случаев с межсуточными колебаниями температуры более 6 °С. К середине столетия в восточной части области, где по наблюдениям отмечается большая повторяемость значительных межсуточных колебаний температуры (более 30 случаев/год), прогнозируется уменьшение их повторяемости на 3–5 случаев/год. В северо-западной части региона,

где повторяемость таких случаев относительно невысокая, будущие изменения повторяемости малы. К концу текущего столетия эта тенденция сохранится и влияние межсуточной изменчивости на уровень ССЗ, по-видимому, будет снижаться.

Несмотря на ожидаемое смягчение неблагоприятных климатических условий в холодный период года, последствия изменения климата на территории области неоднозначным. С одной стороны, понижение уровня климатической дискомфортности и уменьшение межсуточной изменчивости климата должны привести к снижению уровня смертности от ССЗ. С другой стороны, при потеплении климата в регионе прогнозируется рост числа переходов температуры воздуха через 0 °С, что может привести к росту числа простудных заболеваний (Энциклопедия, 2005), а по некоторым оценкам высокая смертность от ССЗ в зимние месяцы связана с сезонным ростом заболеваемости ОРВИ и гриппом, которые, в свою очередь, вызывают до половины всех случаев сердечно-сосудистых осложнений (Лукьянов, 2016). По сравнению с современным летним климатом в будущем можно ожидать увеличения числа волн тепла и их продолжительности в теплый период, роста средней и максимальной температуры волн, что указывает на неблагоприятный прогноз развития ССЗ.

Заключение

В результате проведенного исследования получены оценки наблюдаемых и прогнозных изменений базовых и специализированных климатических характеристик на территории Ленинградской области. На примере строительного и транспортного секторов экономики, а также здравоохранения Ленинградской области проанализировано влияние климатических показателей и их изменений на функционирование объектов и процессов в этих отраслях.

Сформирован перечень приоритетных климатических угроз и рисков для отраслей экономики и здоровья населения. Районирование территории области по величине комплексного погодноклиматического риска позволило выявить районы Ленинградской

области, где инфраструктура различных отраслей экономики наиболее уязвима к воздействиям опасных и экстремальных погодных явлений, а также определить составляющие риска, которые создают наибольшую опасность.

Представленный подход позволяет включить информацию о погодно-климатическом риске в процессы принятия решений при формировании стратегии развития регионов РФ, определить оптимальные пути управления риском и разработки адаптации к изменению и изменчивости климата.

Исследование выполнено при поддержке Росгидромета (направление 3.1 плана НИТР «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптации»)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Глезер О.Б., (2018). Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России. — М.: Институт географии РАН. 154 с.

Катцов В.М., Школьник И.М., Ефимов С.В., Константинов А.В., Павлова В.Н., Павлова Т.В., Хлебникова Е.И., Пикалева А.А., Байдин А.В., Борисенко В.А. (2016). Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть1: Постановка задачи и численные эксперименты. - Труды ГГО. Вып. 583. С. 7–29.

Кобышева Н.В., Акентьева Е.М., Галюк Л.П. (2015). Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. — СПб: «Издательство Кириллица». 214 с.

Кобышева Н.В., Гольберг М.А. (1990). Методические указания по статистической обработке метеорологических рядов — Л.: Гидрометеоздат. 83 с.

Лебедева Н.А. (2021). Оценка транспортной обеспеченности Северо-Западного федерального округа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: экономика и экологический менеджмент. № 2. С. 47–54.

Лукьянов М. М. (2016). Сезонные изменения смертности, влияние аномальной жары и загрязнения воздуха на смертность населения от болезней системы кровообращения в регионах Российской Федерации с различными климатогеографическими характеристиками — Москва, доклад на заседании ГРОКО «Здоровье населения». Российский сегмент.

Методические рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики. Строительство. Транспорт. (2017). — СПб: ГГО. 161 с.

Методические рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики. Энергетика (2022) — СПб: Амирит. 106 с.

Распоряжение Правительства РФ от 25.12.2019 N 3183-р «Об утверждении национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года». 2019.

Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2022 N 3240-р «Об утверждении важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ». 2022.

РД 52.04.563-2002 Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения (2003) — СПб: Гидрометеоздат. 32 с.

Ревич Б. А., Малеев В. В., Смирнова М. Д. (2019). Изменение климата и здоровье: оценки, индикаторы, прогнозы. — Москва: ИНП РАН. 196 с.

Ревич Б.А., Малеев В.В. (2011). Изменения климата и здоровье населения России. Анализ, ситуации и прогнозные оценки. — Москва: ЛЕНАНД. 208 с.

Руководство по климатологической практике. (2018). — ВМО. № 100. 169 с.

Руководство по специализированному климатическому обслуживанию экономики. (2008). — СПб: Астерион. 336 с.

СП 28.13330.2012 «СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии». 2013.

Ткачук С.В., Рубинштейн К.Г. (2012). Прогноз степени комфортности погодных условий в рамках задачи снижения метеопатических реакций населения / В кн. Международная конференция по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Тезисы докладов. — Казань: КФУ. С. 84.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. (2022) — СПб: Наукоемкие технологии. 676 с.

Унтилов Г.В. (2006). Смертность населения города Махачкалы в зависимости от аномалий метеорологических факторов / Автореферат диссертации на соискание степени кандидата медицинских наук. — Махачкала. 18 с.

Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации (2005). — СПб.: Гидрометеоздат. 320 с.

Li P.W. and Chan S.T. (2000). Application of a Weather Stress Index for Alerting the Public to Stressful Weather in Hong Kong // *J. Meteorological Applications*. V. 7. P. 369–375.

Van Vuuren D. P., Edmonds J. A., Kainuma M., Riahi K., Thomson A. M., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenović N., Smith S. J., and Rose S. (2011). The representative concentration pathways: an overview // *Climatic Change*. V. 109. P. 5–31.

Velegrakis A. F. (2013). UN. ECE. Group of Experts on Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks — Geneva: UN. 223 p.

**КОРРЕКТИРОВКА АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ
УРАВНЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ДИФфуЗИИ,
ПРЕДЛОЖЕННОГО А. С. МОНИНЫМ**

Е. Л. Генихович, Д. Ю. Румянцев

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: ego@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 04.10.2023
Поступила после доработки 21.10.2023

Введение

Бурный прогресс вычислительной техники и соответствующее развитие численных моделей атмосферных процессов привели к определенной утрате научным сообществом интереса к аналитическим моделям, разработанным для этих процессов. Действительно, эти аналитические модели обычно получают в результате решения уравнений теоретической физики атмосферы при использовании ряда упрощающих предположений, которые, с одной стороны, обеспечивают возможность получить для этих уравнений аналитическое решение, а, с другой стороны, могут приводить к ограничениям на применимость этого решения для описания условий реальной атмосферы. Вместе с тем, имеется множество примеров, подтверждающих, что аналитические модели до сих пор сохраняют важное научное и практическое значение. В частности, большая часть математических моделей, используемых в мировой практике при расчетах загрязнения воздуха — это гауссовские модели, основанные на аналитическом решении

уравнения атмосферной диффузии при таком способе задания его коэффициентов, который не вполне соответствует современным физическим представлениям об особенностях турбулентного переноса загрязняющих веществ в пограничном слое атмосферы. Более того, нормативные документы Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) для ряда случаев предписывают применение гауссовских моделей при расчетах распространения в атмосфере радиоактивных примесей. С научно-методической точки зрения использование аналитических моделей атмосферной диффузии обеспечивает возможность эффективно описывать и наглядно представлять результат многофакторного влияния определяющих параметров на распространение атмосферных примесей. Можно также упомянуть, что сравнение результатов расчетов по численным и по аналитическим моделям является одним из эффективных средств, используемых при отладке компьютерных программ, реализующих численные модели.

В настоящее время известно довольно ограниченное количество различных аналитических моделей атмосферной диффузии. Практически все они описаны в существующих учебных пособиях и фундаментальных монографиях, в которых обычно можно найти ссылки на фамилии авторов этих моделей и на публикации, содержащие описание моделей. Пожалуй, единственное исключение представляет собой аналитическая модель атмосферной диффузии, которую в 1959 г. опубликовал Андрей Сергеевич Монин. Указанная модель была предназначена для описания зависимости характеристик загрязнения воздуха выбросами примеси из площадного источника (концентрация примеси в атмосферном воздухе, а также ее выпадение на подстилающую поверхность) от метеорологических параметров, определяющих рассеивание примеси в атмосфере (коэффициент турбулентности), технических параметров источника выброса (высота источника, выброс загрязняющего вещества), а также от параметров, которые зависят от свойств примеси и характеристик ее взаимодействия с окружающей средой (скорости седиментации и сухого осаждения). Таким образом, аналитическая модель А. С. Монина является многофакторной, и уже поэтому должна

вызвать несомненный интерес. Более того, А. С. Монин представил свою модель на одном из наиболее представительных международных научных мероприятий середины XX в. в области атмосферной турбулентности и загрязнения воздуха — проводившемся в Оксфорде международном симпозиуме (см. (Monin, 1958)), что обеспечило быстрое распространение информации о модели по всему миру. Перевод на русский язык материалов этого симпозиума под редакцией самого Андрея Сергеевича вышел в 1962 г. (см. (Монин, 1962)). Тем не менее, в последующих зарубежных и российских публикациях, посвященных вопросам моделирования загрязнения воздуха, ссылки на работы (Monin, 1958) и/или (Монин, 1962) обнаружить не удалось.

Целью настоящей работы является доказательство того, что в аналитической модели атмосферной диффузии, опубликованной А. С. Мониним, автором была допущена ошибка. В работе приводятся также предложения по корректировке модели А. С. Монина и подтверждение того, что после этой корректировки модель действительно описывает решение рассматриваемой задачи.

1. Постановка задачи о распространении примеси в атмосфере, использованная А. С. Мониним, и выписанное им решение

В настоящей работе используются обозначения, приведенные в (Монин, 1962), где рассматривается уравнение атмосферной диффузии (1) с граничным условием (2):

$$\frac{\partial q}{\partial t} - w \frac{\partial q}{\partial z} = K \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$\left(K \frac{\partial q}{\partial z} + wq - \beta q \right) \Big|_{z=0} = 0. \quad (2a)$$

Здесь q — концентрация, t — время от момента выброса примеси, z — высота над подстилающей поверхностью, w — скорость седиментации, β — полная скорость сухого осаждения (включает скорость седиментации), K — коэффициент вертикальной диффузии.

При этом полная скорость сухого осаждения β может быть представлена в виде суммы двух слагаемых:

$$\beta = w + v_d, \quad (26)$$

где v_d — скорость сухого осаждения примеси на подстилающую поверхность за счет всех определяющих физических процессов, кроме седиментации. Эта скорость не может быть отрицательной, так что полная скорость сухого осаждения β не может принимать значения, которые меньше w .

Точечный источник, расположенный на высоте $z = H$ над подстилающей поверхностью, характеризуется выбросом Q , «включенным» в момент времени $t = 0$ на указанной высоте. Задача рассматривается в области $[0 \leq t < \infty) \otimes [0 \leq z < \infty)$, причем начальное условие и граничное условие при $z \rightarrow \infty$ автором не выписаны, вероятно, потому что являются очевидными. Приведем их, однако, для полноты постановки задачи:

$$q_{t=0} = Q \delta(z - H); \quad q_{z \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (3)$$

Решение задачи (1)–(2а) при «единичном выбросе» ($Q = 1$) записано А. С. Мониным в работе (Монин, 1962) в следующем виде:

$$\begin{aligned} q(z, t; H) = & \frac{1}{2\sqrt{\pi K t}} \exp\left[-\frac{w(z-H)}{2K} - \frac{w^2 t}{4K}\right] \times \\ & \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{4K t}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{4K t}\right] \right\} - \frac{K}{2\beta - w} \exp\left[\frac{\beta H}{K} + \right. \\ & \left. + \frac{(\beta - w)z}{K} + \frac{\beta(\beta - w)t}{K}\right] \Phi\left[-\frac{z + H + (2\beta - w)t}{\sqrt{2K t}}\right], \end{aligned} \quad (4)$$

где через $\Phi(x)$ обозначено «нормированное нормальное интегральное распределение вероятностей», т. е.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-s^2/2) ds. \quad (5)$$

Это же самое решение (4) в публикации (Monin, 1958) представлено в несколько отличающейся форме, которая, однако, полностью эквивалентна функциональной зависимости (4).

Обозначим размерности времени и длины, соответственно, через T и L , а для размерности произвольной переменной f введем обозначение $[f]$. Очевидно, что рассматриваемые переменные имеют следующие размерности: $[x] = [z] = [H] = L$; $[t] = T$; $[K] = L^2/T$; $[w] = [\beta] = L/T$. Дополнительно отметим, что из начального условия для концентрации (первая из формул (3)) следует, что $[q] = [Q]/L$. Если размерность массы обозначить через M и предположить, что q представляет собой массовую концентрацию, т. е. имеет размерность M/L^3 , то, очевидно, $[Q] = M/L^2$.

Покажем, что выражение (4) для концентрации является ошибочным, поскольку его правая часть неоднородна по размерностям. Действительно, как экспоненты, фигурирующие в правой части (4), так и специальная функция $\Phi(x)$, а также их соответствующие аргументы являются безразмерными. Вместе с тем, правую часть можно представить в виде разности двух членов, $A_1 - A_2$, где размерность A_1 определяется размерностью выражения $(Kt)^{-1/2}$, а размерность A_2 — размерностью выражения $K/(2\beta - w)$. Переходя в указанной разности к безразмерным переменным, легко убедиться в том, что $[A_1] = L^{-1}$, и что $[A_2] = L$. Таким образом, размерности членов разности A_1 и A_2 не совпадают, что доказывает ошибочность формулы (4). Обнаруженная ошибка не является опечаткой, поскольку она имеет место и в публикации (Monin, 1958), в которой, как отмечено выше, аналитическое выражение для той же самой функции $q(z, t; H)$ записано в такой форме, которая

по внешнему виду отличается от выражения (4), но фактически с ним совпадает.

Дополнительно отметим, что для того, чтобы фигурирующая в левой части формулы (3) переменная q имела размерность массовой концентрации M / L^3 , где M означает размерность массы, размерность выброса Q должна соответствовать условию $[Q] = M / L^2$.

2. Корректировка решения А. С. Моница

Если в слагаемом A_1 в формуле (4) положить $w = \beta = 0$, то оно перейдет в известное аналитическое решение уравнения диффузии, соответствующее отсутствию седиментации и сухого осаждения (см., например, (Федоренко, 2008)), и, следовательно, будет иметь ту же самую размерность, что и левая часть. Таким образом, размерность слагаемого A_1 является правильной, а тогда для обеспечения однородности по размерностям слагаемое A_2 тоже должно иметь размерность L^{-1} , а не L . Это позволяет предположить, что при выводе решения задачи (1)–(2) автор просто «потерял» показатель степени «-1» при размерном коэффициенте, фигурирующем в A_2 . Иначе говоря, представляется правдоподобным предположение, что правильная запись решения задачи (1)–(2) дается формулой (6):

$$\begin{aligned}
 q(z, t; H) = & \frac{1}{2\sqrt{\pi K t}} \exp\left[-\frac{w(z-H)}{2K} - \frac{w^2 t}{4K}\right] \\
 & \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{4K t}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{4K t}\right] \right\} - \frac{2\beta-w}{K} \exp\left[\frac{\beta H}{K} + \right. \\
 & \left. + \frac{(\beta-w)z}{K} + \frac{\beta(\beta-w)t}{K}\right] \Phi\left[-\frac{z+H+(2\beta-w)t}{\sqrt{2K t}}\right]
 \end{aligned} \quad (6)$$

В том, что формула (6) действительно представляет решение уравнения (1) с краевыми условиями (2а) и (3), легко убедиться прямой

подстановкой этой формулы. Далее в настоящей статье приводятся результаты «конструктивного» сравнения расчетов по этой формуле с результатами приближенного численного решения задачи (1)–(3) методом сеток. Эти результаты не только подтверждают применимость выражения (6) в качестве решения указанной задачи, но и позволяют охарактеризовать области изменения определяющих параметров, в которых качество аппроксимации численным решением аналитического решения ухудшается.

3. Переход в задаче к безразмерным переменным и результаты численного решения

Введем следующие безразмерные переменные:

$$\begin{aligned} \bar{z} &= \frac{z}{H}; \bar{t} = \frac{Kt}{H^2}; \bar{q} = \frac{qH}{Q} \\ \bar{w} &= \frac{wH}{K}; \bar{\beta} = \frac{\beta H}{K}; \bar{\beta} - \bar{w} \equiv \bar{v}_d = v_d H/K \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда задача (1)–(3) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \bar{t}} - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}}{\partial \bar{z}} = \frac{\partial^2 \bar{q}}{\partial \bar{z}^2}, \quad (8)$$

$$\bar{q}|_{\bar{t}=0} = \delta(\bar{z}-1); \left[\frac{\partial \bar{q}}{\partial \bar{z}} + (\bar{w} - \bar{\beta}) \bar{q} \right] |_{\bar{z}=0} = 0 \quad \bar{q}|_{\bar{z} \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (9)$$

В безразмерных переменных решение задачи (8)–(9), всегда соответствующее высоте источника, равной 1, представляет собой безразмерную функцию двух аргументов (безразмерные время и высота расчетной точки) и двух числовых параметров (безразмерные скорости седиментации и сухого осаждения): $\bar{q}(\bar{t}, \bar{z}; \bar{w}, \bar{v}_d)$. Эта задача решается численно методом сеток с постоянными шагами τ и h по времени и пространству соответственно (см., например, (Федоренко, 2008)) и применительно

к задачам атмосферной диффузии (Берлянд, 1975). В соответствии с общей методологией численного интегрирования уравнений вида (9), которая была развита в (Берлянд, 1975), уравнение (8) предварительно преобразуется таким образом, чтобы исключить необходимость непосредственной аппроксимации разностным отношением члена с первой производной по фазовой переменной. Получающаяся при этом сеточная схема обеспечивает аппроксимацию (8) с порядком $O(\tau + h^2)$. На каждом шагу по времени используется чисто неявная разностная схема (двухточечная по маршевой переменной и трехточечная по фазовой переменной). Схема является консервативной, т. е. обеспечивает интегральное сохранение потока примеси (при записи соответствующих слагаемых в разностной форме). Результирующая система линейных уравнений с трехдиагональной матрицей решается методом прогонки. Матрица данной системы в рассматриваемом случае характеризуется диагональным преобладанием, что обеспечивает устойчивость численного метода прогонки.

Представленные в настоящей статье результаты численного счета безразмерных концентраций \bar{q} , иллюстрирующих их зависимости от безразмерного времени диффузии \bar{t} , безразмерной высоты \bar{z} , а также от безразмерных скоростей \bar{w} и \bar{v}_d , получены при использовании шагов $\tau = 0,1$ и $h = 0,05$ (непосредственно на рисунках обозначения безразмерных переменных даны без черты сверху). На рисунках 1–3 показаны распределения приземных ($\bar{z} = 0$) концентраций \bar{q} в зависимости от безразмерного времени диффузии \bar{t} , изменяющегося в диапазоне от 0 до 10, при различных комбинациях скоростей седиментации и сухого осаждения, которым этот максимум соответствует.

Как, в частности, следует из рисунков 1–3, при заданном \bar{v}_d увеличение \bar{w} приводит к увеличению максимума приземных концентраций и уменьшению времени диффузии, которому этот максимум соответствует.

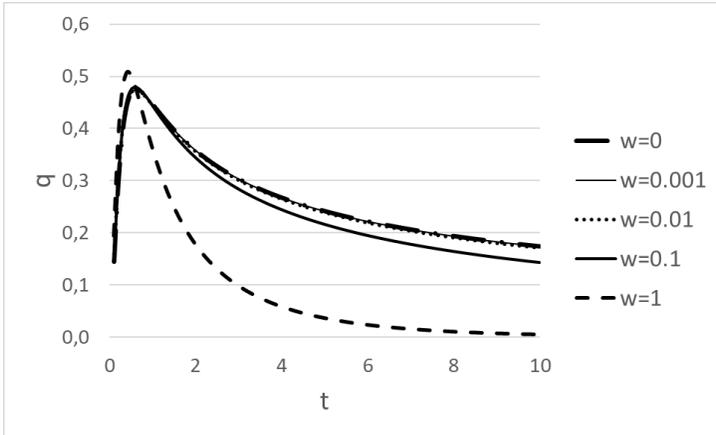


Рис. 1. Приземные концентрации \bar{q} в зависимости от времени диффузии \bar{t} при $\bar{v}_d = 0$ и $\bar{w} = 0; 0,001; 0,01; 0,1$ и 1

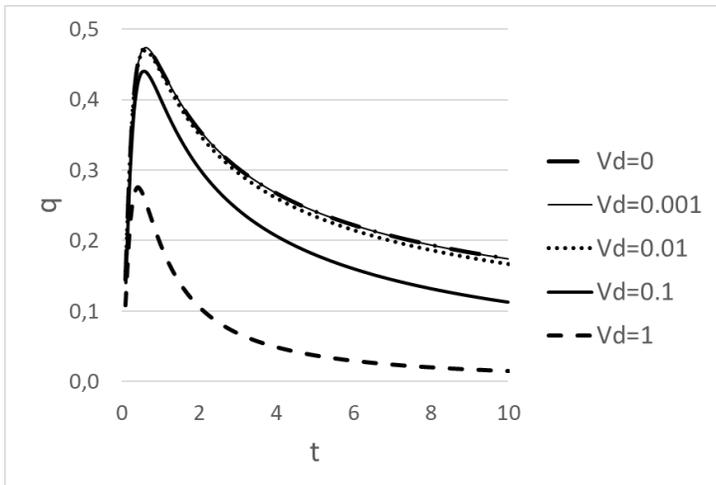


Рис. 2. Приземные концентрации \bar{q} в зависимости от времени диффузии \bar{t} при $\bar{w} = 0$ и $\bar{v}_d = 0; 0,001; 0,01; 0,1$ и 1

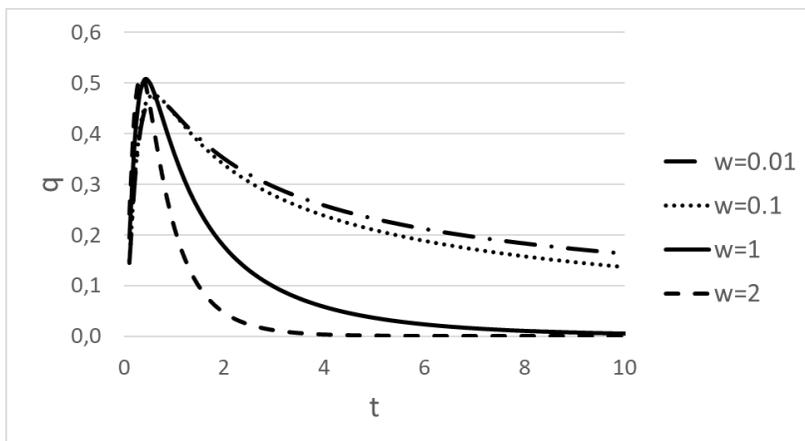


Рис. 3. Приземные концентрации \bar{q} в зависимости от времени диффузии \bar{t} при $\bar{v}_d = 0,01$ и $\bar{w} = 0,01; 0,1; 1$ и 2

Вместе с тем, при заданном \bar{w} увеличение \bar{v}_d приводит к уменьшению максимума приземных концентраций, сопровождающемуся уменьшением времени диффузии, которому этот максимум соответствует (последний вывод согласуется с общими физическими представлениями, согласно которым при стремлении \bar{v}_d к бесконечности граничное условие (2а) переходит в условие полного поглощения, что соответствует концентрации на подстилающей поверхности, равной нулю..

4. Сопоставление результатов расчетов по формуле (6) с результатами численного интегрирования задачи (8)–(9)

Полученное численное решение сопоставлялось с результатами расчета по аналитической формуле (6) в диапазоне безразмерных времен от 0 до 10^5 . Для иллюстрации на рисунках 4–7 приведены «корреляционные графики» значений безразмерной концентрации \bar{q} ,

рассчитанных при фиксированных комбинациях безразмерных переменных \bar{z} , \bar{w} и \bar{v}_d для одних и тех же безразмерных времен диффузии \bar{t} с использованием формулы (6) и численной схемы интегрирования задачи (8)–(9). Понятно, что при использовании одинаковых масштабов на осях этих корреляционных графиков «идеальному согласию» между расчетом по аналитической формуле и численным счетом соответствует попадание на корреляционном графике соответствующей точки на биссектрису.

Пример такого сопоставления приведен на корреляционных графиках (рис. 4), на оси абсцисс которых отложены значения безразмерной концентрации \bar{q} , рассчитанной по формуле (6) как функция безразмерного времени \bar{t} при $\bar{w} = 0$, $\bar{v}_d = 10^{-4}$, а также при значениях безразмерной высоты $\bar{z} = 0,05; 0,2$ и 5 , а по оси ординат — значение безразмерной концентрации в точке с теми же безразмерными аргументами, полученное из численного решения.

Определенное расхождение между значениями концентраций, рассчитанных по формуле (6) и полученных в результате численного решения уравнения диффузии, на этих графиках отмечается только в нескольких точках, которые, как показывает дополнительный анализ, соответствуют малым временам диффузии. Даже на уровне высоты источника (безразмерная переменная $\bar{z} = 1$), на котором сильнее всего сказываются погрешности численной аппроксимации фигурирующей в начальном условии дельта-функции Дирака, при значении безразмерного времени \bar{t} , равном 1 , расхождение составляет менее 3% и с дальнейшим увеличением времени диффузии продолжает уменьшаться. Можно полагать, что погрешностями численной аппроксимации дельта-функции Дирака в начальном условии объясняется появление нескольких отскочивших точек и на корреляционных графиках на рисунке 4 а, б. Хорошее согласие результатов численных и аналитических расчетов получено также при значениях \bar{v}_d , равных 10^{-3} и 10^{-2} .

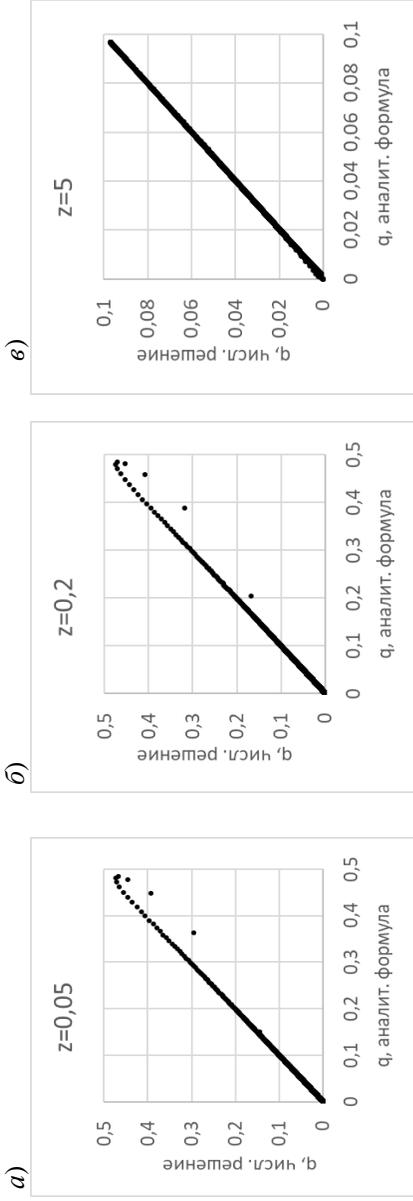


Рис. 4. Корреляционные графики значений безразмерной концентрации \bar{q} (расчет по откорректированной формуле А. С. Монина и численное решение) при $\bar{v}_d = 10^{-4}$, $\bar{w} = 0$ и $\bar{z} = 0,05$ (а), $0,2$ (б) и 5 (в)

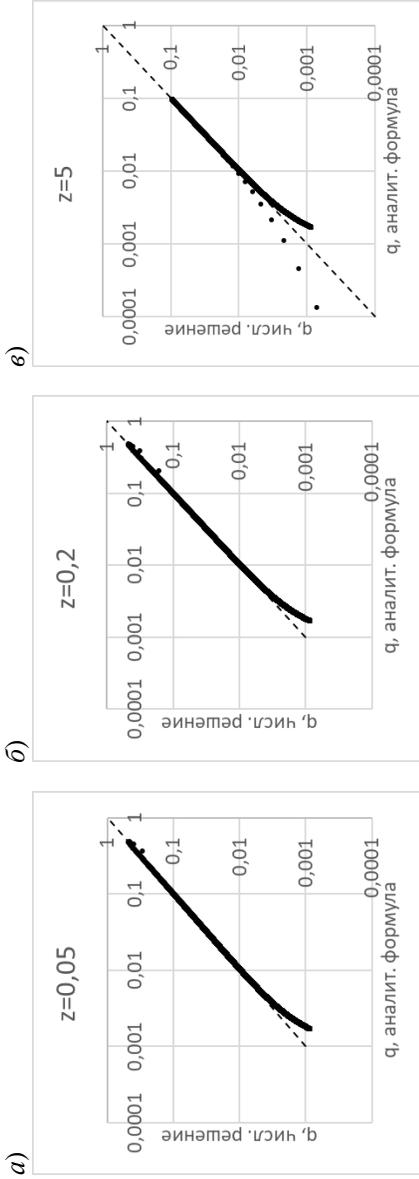


Рис. 5. Корреляционные графики значений безразмерной концентрации в билогарифмическом масштабе (расчет по откорректированной формуле А. С. Моница и численное решение) при $\bar{v}_d = 10^{-4}$, $\bar{w} = 0$ и $\bar{z} = 0,05$ (а), 0,2 (б) и 5 (в)

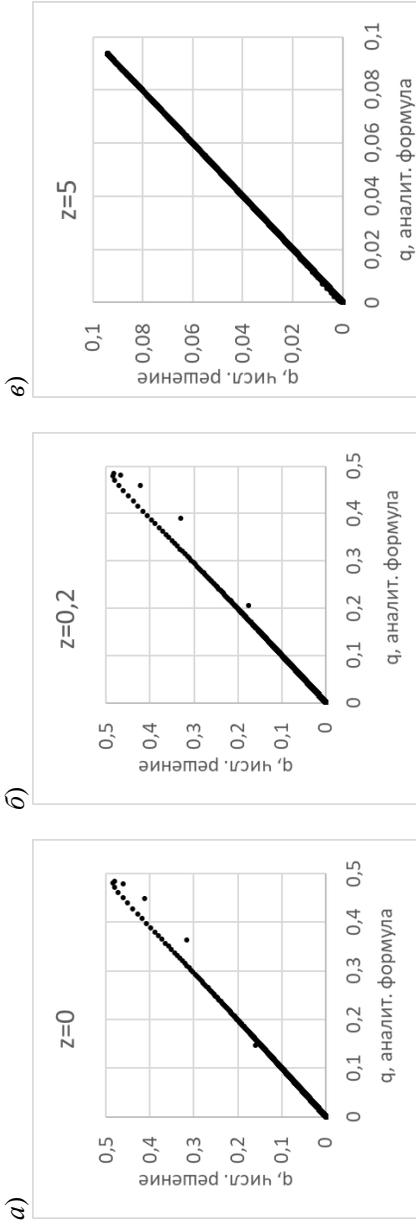


Рис. 6. Корреляционные графики значений безразмерной концентрации (расчет по откорректированной формуле А. С. Моница и численное решение) при $\bar{v}_d = 10^{-3}$, $w = 10^{-2}$ и $\bar{z} = 0$ (а), 0,2 (б) и 5 (в)

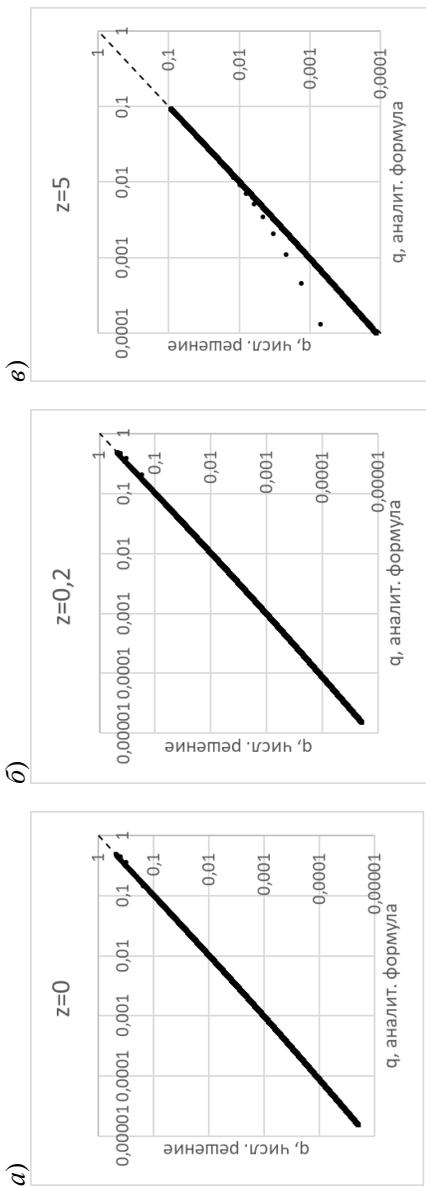


Рис. 7. Корреляционные графики значений безразмерной концентрации в биграфическом масштабе (расчет по откорректированной формуле А. С. Монина и численное решение) при $\overline{v_d} = 10^{-3}$, $\overline{w} = 10^{-2}$ и $\overline{z} = 0$ (а), 0,2 (б) и 5 (в)

Выбор координатных осей, использованный при построении рисунка 4, не позволяет сделать вывод о степени расхождения расчетных концентраций в области их очень малых значений. Поэтому эти графики перестроены в билогарифмическом масштабе и представлены на рисунке 5, из которого следует, что значения концентрации, рассчитанные по формуле (6) и полученные в результате численного решения задачи (8)–(9), в основном согласуются друг с другом, хотя при значительных временах диффузии (которым соответствует уменьшение концентраций примерно на 1,5–2 порядка величины) для больших значений безразмерной высоты численный счет начинает заметно отличаться от аналитики (см., например, рис. 5в).

Определенные отличия отмечаются при больших значениях безразмерной высоты (рис. 5в). Такие отличия, вероятно, связаны с тем, что задача (8)–(9) аналитически интегрируется в бесконечной по высоте области, что не может быть обеспечено при ее численном интегрировании методом сеток. Соответствующие эффекты становятся особенно заметны при больших временах диффузии, когда в связи с «вытеканием» примеси через конечную верхнюю границу области интегрирования может, вообще говоря, нарушаться выполнение разностного аналога закона сохранения потока примеси внутри этой области.

Для случая $\bar{v}_d = 10^{-3}$, $\bar{w} = 10^{-2}$ и $\bar{z} = 0, 0,2$ и 5 корреляционные графики безразмерных концентраций, рассчитанных по формуле (6) и полученных в результате численного решения задачи (8)–(9), представлены на рисунках 6, 7. Здесь счет осуществляется при $\tau = 0,1$ и $h = 0,1$. Как следует из этих рисунков, в данном случае также отмечается хорошее согласие между соответствующими значениями концентрации в основной части области интегрирования. При этом отмечаются определенные расхождения как при малых значениях времени диффузии (для высот, близких в высоте источника), так и асимптотически по времени (при больших безразмерных высотах).

Заключение

Приведенные в статье результаты подтверждают применимость предложенной в статье корректировки формулы, опубликованной А. С. Мониным, в качестве аналитического решения задачи (1)–(3) о турбулентной диффузии атмосферной примеси с учетом ее сухого и влажного осаждения. Они также свидетельствуют о том, что численное решение задачи (8)–(9) в целом хорошо аппроксимирует формулу (6). Одновременно они указывают на то, что погрешность аппроксимации при прочих равных условиях может существенно зависеть от того, в какой точке плоскости (z,t) эта погрешность оценивается (особенно чувствительной характеристикой при этом является относительная погрешность). В данной связи при использовании численного решения следует с определенной осторожностью относиться к оценкам погрешности сверху, которые обычно не обеспечивают учет соответствующих локальных вариаций. Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что результаты статьи подтверждают эффективность приведенных в монографии (Берлянд, 1975) рекомендаций по практической реализации численных схем интегрирования уравнения атмосферной диффузии, в том числе, в части аппроксимации в этом уравнении слагаемого с первой производной по фазовой переменной.

Представляется, что возможность ввести в научный оборот формулу (6) в качестве аналитического решения рассмотренной А. С. Мониным задачи (1)–(3) даже в наше время имеет не только чисто теоретическое, но и практическое значение. В данной связи, например, следует отметить, что, как показано в настоящей работе, при использовании сеточных методов численного интегрирования уравнения атмосферной диффузии увеличение времени диффузии может приводить к росту вычислительных погрешностей. В то же время, в мировой практике сейчас широко используются численные модели переноса примесей в региональном и глобальном масштабе (в том числе, химические транспортные модели, климатические модели и др.), для которых вопрос о качестве решения, получаемого при длительных временах интегрирования и/или глобальных

масштабах переноса, является достаточно актуальным. Факт наличия аналитического решения (6) может быть учтен и использован при разработке, тестировании и валидации таких моделей.

Авторы приносят рецензенту благодарность за сделанные замечания, которые были учтены при подготовке окончательной версии статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Берлянд М. Е. (1975). Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеониздат. 428 с.

Монин А. С. (1962). О граничном условии на поверхности земли для диффундирующей примеси / В сб.: Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха; под ред. А. С. Монина. — М.: Изд. иностр. литературы. С. 476–478.

Федоренко Р. П. (2008). Введение в вычислительную физику. — Долгопрудный: Интеллект. 504 с.

Monin A. S. (1958). On the boundary condition on the Earth surface for diffusing pollution / In: Atmospheric Diffusion and Air Pollution. Proc. Symp. Oxford, August 24–29 1958 / F.N Frankiel., P.A Sheppard (eds.) // Advances in Geophysics. V. 6. P. 435–436.

**О РАЗВИТИИ МЕТОДОВ ШТОРМОВОГО ОПОВЕЩЕНИЯ
В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ РЕГИОНЕ
НА ОСНОВЕ РАЗНОРОДНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

*И. А. Тарабукин, Е. В. Дорофеев, М. В. Львова,
Ю. П. Михайловский, О. А. Дмитриева, Е. Я. Богомазова,
А. С. Горбатовская, П. Ю. Кузьменко*

Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: tarabukin@mail.ru

Поступила в редакцию 26.09.2023
Поступила после доработки 17.10.2023

Введение

В условиях меняющегося климата и интенсивной урбанизации число опасных явлений погоды (ОЯП), способных нанести значимый социально-экономический ущерб, в последнее десятилетие в нашей стране непрерывно возрастает, достигнув исторического максимума в 2021 г. (Обзор..., 2022). Наибольший ущерб, как правило, наносят ОЯП конвективного происхождения (сильные осадки, град, шквалистый ветер), а также аномально холодная погода в зимний период и чрезвычайная пожарная опасность, сохраняющаяся в ряде регионов на протяжении нескольких месяцев в течение теплого периода.

В этой связи важными условиями своевременного оповещения и возможного предупреждения перечисленных явлений являются:

– использование современных средств оперативных метеонаблюдений («штормового оповещения»), как правило, объединенных в государственную гидрометеорологическую сеть, в целях получения первичной гидрометеорологической информации (Дашко, 2005);

– использование специализированной гидрометеорологической информации Единого государственного фонда данных;

– автоматизация процессов сбора, обработки и хранения геофизической информации;

– комплексирование результатов гидрометеорологического и геофизического мониторинга на единой картографической основе, формирование вторичной информационной продукции (Дашко, 2005);

– ассимиляция первичной и вторичной информационной продукции в численных моделях прогноза погоды;

– применение методов машинного обучения, позволяющих на основе репрезентативной обучающей выборки разработать алгоритмы распознавания (классификации) ОЯП.

Полный цикл реализации перечисленных условий, начиная от усвоения разнородной геофизической информации, поступающей с наземной наблюдательной сети Росгидромета, а также других источников, осуществляющих контроль геофизической обстановки, заканчивая созданием системы оперативного метеорологического прогноза, позволил создать систему «КАСМЕТЕО» (Тарабукин, Дорофеев, 2015; Дорофеев и др., 2015).

Позднее, с осуществлением модернизации измерительных и наблюдательных платформ, возросшими потребностями хранения больших объемов данных, развитием методов их объективного контроля и совместного использования, была создана более эффективная масштабируемая система получения, обработки, усвоения и распространения метеорологической информации.

Необходимость использования всех видов гидрометеорологических наблюдений и бюллетеней данных, формируемых на их основе, послужила основой концепции создания

в ГГО программно-технического комплекса геофизического мониторинга (ПТК ГФМ ГГО).

В настоящей работе представлен обзор возможностей искусственного интеллекта в метеорологическом обслуживании на примере Северо-Западного региона и предложены пути совершенствования технологий, реализованных в программно-аппаратных средствах (ПАС) системы «КАСМЕТЕО» и ПТК ГФМ ГГО, за счет внедрения моделей машинного обучения. Применение современных обучающих моделей на репрезентативной обучающей выборке позволит разработать алгоритмы распознавания и классификации ОЯП по данным разнородной геофизической информации и, в конечном итоге, повысит качество климатического обслуживания территориальных потребителей.

Система метеорологического мониторинга Северо-Западного региона

В настоящее время система метеорологического мониторинга Северо-Западного региона основана на использовании возможностей ПАС «Синоптик-Прогнозист», входящего в состав ПТК ГФМ ГГО.

ПАС «Синоптик-Прогнозист», посредством обращения к унифицированному архиву данных (табл. 1), обеспечивает обобщение, подготовку и формирование метеорологической продукции в виде:

- синоптических или кольцевых карт, построенных на основе раскодированных сообщений в кодах КН-01, METAR и дополненных изобарами, изотермами, изотенденциями, фактическими положениями фронтов и центров барических образований;

- карт высотной топографии, построенных на основе сообщений в кодах КН-04, GRID, GRIB и дополненных изогипсами, изотермами, фактическими положениями фронтов и центров барических образований;

- сводок фактической и прогностической погоды для аэродрома базирования и запасных аэродромов в текстовой форме в формате METAR и TAF;

- кривых временного хода различных геофизических величин.

Важнейшую роль в формировании сверхкраткосрочного прогноза занимают композитные радиолокационные продукты (карты явлений, высоты радиоэха и т. д.) и спутниковые карты, дополненные, при необходимости изобарами и направлением ветра (Дашко, 2005).

Источниками данных для ПАС «Синоптик-Прогнозист» являются:

- специализированные тематические серверы (ТС), выполняющие прием и оперативную обработку геофизической информации в зоне ответственности ГГО с устанавливаемых на наземной наблюдательной сети (ННС) Росгидромета платформ: измерительных комплексов, регистраторов и индикаторов геофизических величин;

- интегрированная информационно-телекоммуникационная система (ИИТС) Росгидромета;

- сторонние (ведомственные) источники, предоставляющие информацию специальным образом, например через FTP-ресурс.

Поступающие данные могут быть получены, преобразованы и представлены на вход ПАС с применением разных информационных технологий, а также в различных кодовых формах и интервалах пространственно-временного осреднения и обобщения: оперативные, режимные, статистические, прогностические и т. д.

Виды, объемы и некоторые характеристики поступающей информации представлены в таблице 1.

Отображение разного рода метеорологической информации на единой картографической основе позволяет полнее оценить синоптическую ситуацию и составить сверхкраткосрочный прогноз явлений погоды для конкретной территории или населенного пункта. Для примера на рисунке 1 проиллюстрирована возможность отображения композитной карты для Европейской территории с нанесением информации из различных источников (*сеть наземных наблюдений, сеть аэрологического зондирования*).

Таблица 1

Виды, источники и характеристики доступной метеорологической и сопутствующей информации

Наименование источников информации	Виды информации	Перечень формируемой информации	Период обновления информации	Объем информации за 1 срок от 1 пункта
<p>ИИТС Росгидромета</p>	<p>Радиолокационные данные: а) в коде BUFR, б) абонентские файлы, в) объемные файлы</p>	<p>Отражаемость в горизонтальном и вертикальном каналах, доплеровская скорость, ширина спектра, дифференциальная отражаемость, дифференциальная фаза, коэффициент корреляции вертикальной и горизонтальной составляющей сигнала, удельный дифференциальный фазовый сдвиг, продукты вторичной обработки ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» (метеорологические явления, опасные явления, высота верхней и нижней границы облачности, вертикально интегрированная водность, горизонтальный и вертикальный сдвиг ветра, интенсивность осадков, видимость в облаках)</p>	<p>10 мин</p>	<p>а) 0,1 мб б) 1–2 мб в) 10–12 мб</p>

Наименование источников информации	Виды информации	Перечень формируемой информации	Период обновления информации	Объем информации за 1 срок от 1 пункта
ИИТС Ростидромета	Приземные данные в коде КН-01	Температура воздуха, влажность, давление, ветер (направление, средняя скорость (за 10 мин), максимальные порывы (за 10 мин и за прошедшие 3 ч)	3 ч	2–3 мб за срок
ИИТС Ростидромета	Аэрологические данные в коде КН-04	Профиль температуры, влажности, давления, ветра по высотам	12 ч	0,1–1,5 мб за срок
ИИТС Ростидромета	Прогностические данные в форматах GRIB, GRID	Приземные и высотные значения метеопараметров.	6 ч	3 кб–2 мб
ИИТС Ростидромета	Информация от метеорологических спутников, после осуществления географической привязки	Изображения на различных спектральных каналах (ТВ, ИК, высокого разрешения и т. д.)	1 ч	60–70 мб
ИИТС Ростидромета	Штормовые сообщения в коде WAREP	Текстовые сообщения в журнале и отображение на картографической основе в виде значков условных обозначений	В режиме реального времени	2,9–3,4 мб в сутки

Наименование источников информации	Виды информации	Перечень формируемой информации	Период обновления информации	Объем информации за 1 срок от 1 пункта
ИИС Ростдромета	Авиационная погода в кодах METAR, SPECY, TAF	Телеграммы и в виде ручных на картографической основе	30 мин	1–2 мб за срок
По запросу	Данные самолетного зондирования в кодах AMDAR, BUFR	Скорость и направление ветра, температура воздуха с привязкой по времени и местоположению воздушного судна (дополнительно возможны данные влажности (при наличии датчика) и показатель турбулентности)		
ИИС Ростдромета и тематический сервер «Гроза»	Система грозопеленгаторов 57 датчиков	Время, дата, координаты и дополнительные характеристики обнаруженных молниевых разрядов	По мере обнаружения молний. От 1 мин.	50 кб в ч
Тематический сервер «Озон»	Озонометрическая сеть Ростдромета. 28–30 станций	Общее содержание озона, спектральный состав ультрафиолетовой радиации из полусферы неба в диапазоне от 290 до 400 нм	60 раз в сутки	50 кб в ч

Наименование источников информации	Виды информации	Перечень формируемой информации	Период обновления информации	Объем информации за 1 срок от 1 пункта
Тематический сервер «Атмосферное электричество»	Сеть наблюдений за атмосферным электричеством Ростгидромета. 11 пунктов	Напряженность электрического поля атмосферы (E), положительная (1 +) и отрицательная (1-) электрическая проводимость воздуха	1 раз в мин. Режимные данные: среднечасовые – 1 раз в месяц	100 кб в сутки
Тематический сервер «Актинометрия»	Актинометрическая сеть Ростгидромета. 10 станций	Прямая, рассеянная, суммарная, отраженная солнечная радиация; коротковолновый и длинноволновый радиационный баланс, альбедо подстилающей поверхности, прямая солнечная радиация на горизонтальной поверхности. В условиях ясного неба: характеристики прозрачности атмосферы	1 раз в 10 мин. Режимные данные: часовые, суточные и месячные – 1 раз в месяц	50 кб в ч
Тематический сервер «СВЧ-радиометрия»	Многопунктовая система СВЧ радиометров	Интегральное влагосодержание безоблачной атмосферы, интегральный водозапас облачной атмосферы, радиояркостная температура собственного излучения атмосферы, вертикальный профиль температуры.	1 раз в сут.	50 кб в ч
Тематический сервер «Ультрафиолет»	Многопунктовая система УФ индикаторов 66 станций	Индекс эритемно-активной радиации, УФБ-радиация	2–3 раза в сут.	50 кб в ч

Наименование источников информации	Виды информации	Перечень формируемой информации	Период обновления информации	Объем информации за 1 срок от 1 пункта
Тематический сервер «Химия осадков»	Многопунктовая система измерения химического состава осадков	Данные по кислотности, удельной электропроводности, общей минерализации и химии осадков (сульфаты, хлориды, нитраты, гидрокарбонаты, ионы аммония, натрия, калия кальция магния)	Режимные данные: ежедневные с месячным периодом обновления	50 кб в ч
Тематический сервер «Малые газовые составляющие»	Многопунктовая система измерения химического состояния атмосферы	Данные измерений концентрации малых газовых составляющих	4 раза в месяц	10 кб в сут.

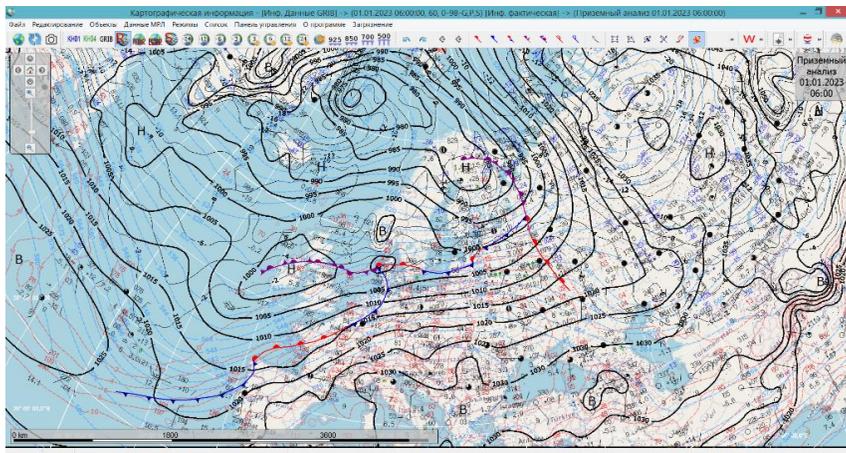


Рис. 1. Пример синоптической приземной композитной карты с нанесенными изобарами (черные сплошные линии), изогипсами 500 мб (голубые пунктирные линии), изотермами 850 мб (красные пунктирные линии)

Внедрение алгоритмов машинного обучения в практику сверхкраткосрочного прогнозирования

Автоматизация процесса сбора, обработки геофизической информации, а также организация унифицированного архива метеорологических данных является необходимым условием использования в практике метеообеспечения стремительно развивающихся методов искусственного интеллекта и машинного обучения при анализе больших объемов данных, обнаружения закономерностей и прогнозирования изменений погодных условий (Михайловский и др., 2017; Синькевич, Попов и др., 2020; Ravuri и др., 2021).

Данные новейших метеорологических радиолокаторов (с возможностью измерения доплеровских и поляризационных характеристик метеобъектов) открывают широкие возможности для решения задач радиолокационного распознавания ОЯП, связанных с конвективной облачностью и осадками.

В настоящее время на территории Северо-Западного региона функционирует 4 современных доплеровских метеорологических радиолокатора С-диапазона (ДМРЛ-С), обеспечивающих измерение доплеровских и поляризационных характеристик метеобъектов (рис. 2). В ближайшее время планируется ввод в эксплуатацию еще трех ДМРЛ-С.

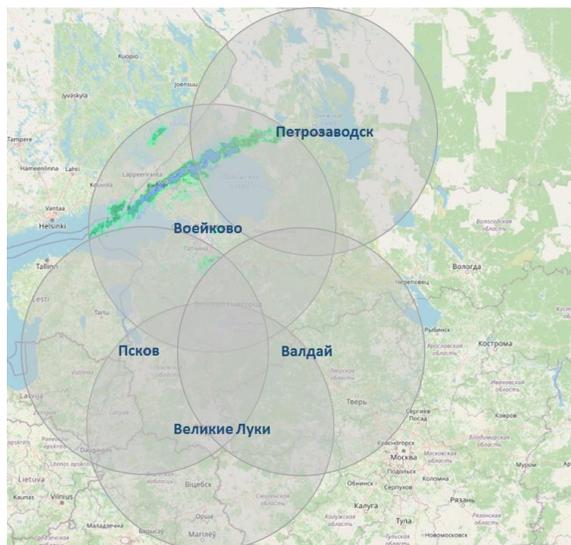


Рис. 2. Зона радиолокационного охвата функционирующих ДМРЛ-С Северо-Западного региона (серые окружности)

Использование доплеровских характеристик гидрометеоров в синоптической практике метеоподразделений описано в статьях (Дмитриева и др., 2016; 2020). Возможность применения алгоритмов классификации гидрометеоров на основании поляризационных характеристик ДМРЛ-С показана в работе (Синькевич, Попов и др., 2020).

Важным шагом дальнейшего развития при разработке алгоритмов радиолокационного распознавания (классификации) ОЯП являлось

построение нейронных сетей в процессе изучения влияния связи частоты молний и радиолокационных характеристик (Синькевич, Куров, 2022). Из всего набора радиолокационных данных выявлены параметры, которые в нейросетевых моделях являются наиболее чувствительными, т. е. оказывающими наибольшее влияние на выходную характеристику — факт наличия или отсутствия молнии. Контрольным инструментом подтверждения наличия молниевых разрядов являлась система грозопеленгационных датчиков. Необходимо заметить, что в работе А. А. Синькевича с соавторами (2022) выборки исходных данных (обучающая, контрольная, тестовая) были сформированы из набора радиолокационных характеристик, измеряемых (и вычисляемых) по данным ДМРЛ-С Воейково, однако репрезентативная обучающая выборка может быть построена с использованием нескольких ДМРЛ-С Северо-Западного региона. Кроме того, в состав выборки могут быть включены данные наземных метеорологических и аэрологических наблюдений, спутниковых изображений и других достоверных источников, перечисленных в таблице 1 (Ravuri и др., 2021; Wang и др., 2021).

Основные задачи современного этапа внедрения методов машинного обучения в метеорологическую отрасль и способы их решения

Таким образом, в ходе выполнения работ, связанных с оценкой возможности применения конкретных методов машинного обучения при распознавании ОЯП, должны быть решены следующие задачи:

- определение доступных источников метеорологических данных (табл. 1), которые могут быть использованы в алгоритмах машинного обучения;
- разработка методологии и программных средств контроля входных данных (например, на основе ПАС «Синоптик-Прогнозист»), позволяющих комплексировать на единой подложке различную геофизическую информацию, тем самым исключая возможные случаи ошибок в результатах наблюдений (рис. 3);

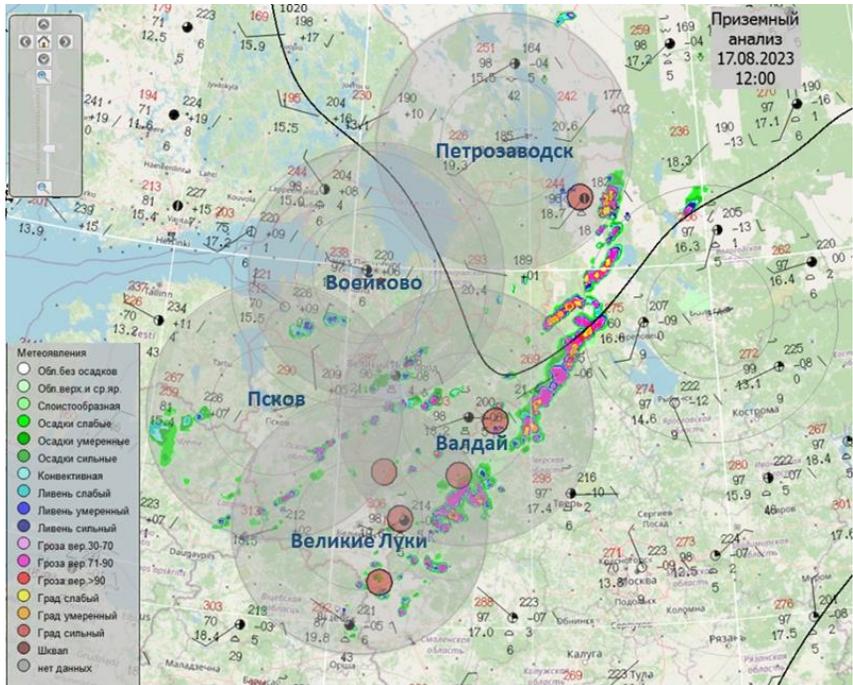


Рис. 3. Пример отображения на ПАС «Синоптик-Прогнозист» опасных явлений погоды для Северо-Западного региона на основе совмещения информации нескольких источников (ДМРЛ-С, наземная метеорологическая)

- разработка технического решения эффективного хранения данных обучающей выборки, основанная на использовании современных систем управления реляционными базами данных;
- реализация соответствующих программных средств;
- анализ данных с использованием одного из доступных программных пакетов статистического анализа, проведение сопоставления эффективности работы различных методов машинного обучения;
- обучение модели и формализация результатов в виде численных алгоритмов, программная реализация алгоритмов, оценка эффективности разработанных алгоритмов.

С расширением перечня источников метеорологического мониторинга, а также совершенствованием технологий сбора и обработки гидрометеорологической информации данные, поступающие от современных наблюдательных платформ, характеризуются большой точностью, многомерностью, высокой пространственно-временной масштабируемостью, что в конечном итоге влечет за собой повышенные требования к организации архивов гидрометеорологического назначения. И хотя постоянное развитие технологий хранения больших объемов данных на базе ПТК ГФМ ГГО улучшает доступ к метеорологической информации, эффективность их обслуживания и оперативного использования все еще далека от удовлетворения требований производительности и быстродействия. Особенно это касается полуструктурированных и неструктурированных архивов, хранящихся преимущественно в форматах GRIB (общая регулярно распределяемая информация в двоичной форме), BUFR (двоичная универсальная форма для представления метеорологических данных) (Caron, Oxelson, 2013) и текстовом виде. В связи с этим возникает необходимость поиска эффективных методов хранения и обслуживания многомерных метеорологических массивов на основе технологии хранения больших данных и их многомерных характеристик.

Заключение

За последние несколько десятилетий метеорологическое прогнозирование перешло от ручного сбора и интерпретации данных к использованию вычислительных систем нового поколения с элементами искусственного интеллекта. Фундаментальная роль в этом процессе принадлежит автоматизации процедуры сбора и обработки информации, поступающей с гидрометеорологических сетей.

В статье рассмотрена возможность технологической конвергенции многомерного массива гидрометеорологических данных и решений искусственного интеллекта с последующим результатом сверхкраткосрочного и краткосрочного прогноза развития

атмосферных процессов на примере Северо-Западного региона. Такой современный подход позволит в дальнейшем своевременно спрогнозировать возникновение и развитие многих опасных явлений погоды, принять превентивные меры по снижению возможных потерь и ущерба, уменьшению масштабов чрезвычайных ситуаций.

Кроме того, алгоритмы искусственного интеллекта способны выявлять закономерности и тенденции в большом объеме разнородной геофизической информации, которые могут быть упущены при аналитическом анализе (например, между поляризационными параметрами ДМРЛ-С и типом выпадающих осадков, влагозапасом атмосферы и приближающимися атмосферными фронтами с зонами осадков и т. д.), что в конечном итоге положительным образом должно отразиться на оправдываемости прогнозов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 22-27-20031) и Санкт-Петербургского научного фонда (Соглашение № 58/2022 от 15 апреля 2022 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. (2022) Москва. Росгидромет. 220 с.

Дашко Н.А. Курс лекций по синоптической метеорологии (2005). — Владивосток: ДВГУ. 523 с.

Тарабукин И.А., Дорофеев Е.В. (2015). Комплексная автоматизированная информационно-измерительная система метеообеспечения авиации и прогноза опасных гидрометеорологических явлений КАСМЕТЕО // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып. 179. С. 88–98.

Дорофеев Е. В., Зверев В. В., Львова М. В., Тарабукин И. А. (2015). Развитие комплексной автоматизированной информационно-измерительной системы метеообеспечения авиации и прогноза опасных гидрометеорологических явлений «КАСМЕТЕО» // Труды ИГО. Вып. 577. С. 127–140.

Синькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. (2020). Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером по данным дистанционных измерений // Оптика атмосферы и океана. Т. 33. № 2. С. 153–158.

Дмитриева О.А., Дорофеев Е.В., Львова М.В., Тарабукин И.А. (2016). Использование информации о доплеровской радиальной скорости метеочелей в задачах синоптического анализа // *Метеорология и гидрология*. № 11. С. 88–95.

Дмитриева О.А., Львова М.В., Тарабукин И.А. (2020). Развитие методов синоптического анализа с использованием информации о доплеровской радиальной скорости // *Метеорология и гидрология*. № 7. С. 120–127.

Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д., Гопалакришнан В., Довгалою Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Куров А.Б., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абишаев А.М. (2017) Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // *Метеорология и гидрология*. № 6. С. 31–45.

Синькевич А.А., Куров А.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е. (2022). Исследование характеристик грозových облаков на северо-западе России с использованием нейронных сетей // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 35. № 12 (407). С. 1008–1014.

Синькевич А.А., Попов В.Б., Абишаев А.М., Вое В.А., Pawar S.D., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Gopalakrishnan V., Геккиева Ж.М. (2020). Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 33. № 12 (383). С. 932–936.

Ravuri S., Lenc K., Willson M. et al. (2021). Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar // *Nature*. V. 597. P. 672–677. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03854-z>.

Wang C., Wang P., Wang P. et al. (2021). Using conditional generative adversarial 3-D convolutional neural network for precise radar extrapolation IEEE // *J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.* V. 14. P. 5735–5749. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/94>.

Caron J., Oxelson J. (2013). BUFR and GRIB file formats considered harmful for data archiving / Egu General Assembly.

ГРАДОВЫЕ ОБЛАКА СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

*А. А. Синькевич, М. Л. Торопова, Ю. П. Михайловский,
Н. Е. Веремей, А. Б. Куров, И. А. Тарабукин*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: sinkevich51@mail.ru

Поступила в редакцию 3.10.2023
Поступила после доработки 25.10.2023

Введение

Град является опасным явлением погоды. Градобития ежегодно причиняют крупный ущерб агропромышленному комплексу, объектам энергетической, промышленной, жилищно-коммунальной инфраструктуры. В связи с этим исследование градовых облаков не только сохраняет свою актуальность, но и становится все более востребованным в условиях изменяющегося климата.

Исследования климатологических особенностей выпадения града представляется нетривиальной задачей, так как град (как и прочие осадки) отличается высокой пространственной изменчивостью и сведения о событиях носят нерегулярный характер (Чернокульский, 2022). Это косвенно подтверждается относительно малым количеством работ по анализу климатических условий возникновения градобитий на территории Российской Федерации (Жарашуев, 2012, 2021; Кужевская и др., 2019; Чернокульский и др., 2022).

В последние годы выполняются работы по оценке возможности использования различных источников информации для получения

данных о выпадении града. Наряду с наземными метеорологическими наблюдениями учитывается информация, опубликованная в сети Интернет со слов очевидцев (Алексеева и др., 2023). На основании оценок неустойчивости атмосферы, выполняемых как по данным аэрологических наблюдений, так и с применением спутниковых наблюдений и выходных данных глобальных моделей атмосферы, исследуются методики прогноза града по территории (Кагемазов, Созаева, 2020). Предпринимаются попытки создания различного рода баз данных и сводок опасных явлений погоды, содержащих сведения об опасных конвективных явлениях, включая град (Шихов и др., 2021; Алексеева и др., 2023).

Среди всех источников получения информации о граде и облаках, в которых он формируется, следует отметить перспективность использования метеорологических радиолокаторов, особенно доплеровских (ДМРЛ-С). Уже предложены методики диагноза выпадения града по данным ДМРЛ-С (Алексеева и др., 2023), а исследования закономерностей развития градоопасных облаков с помощью ДМРЛ-С создают основу для совершенствования методов краткосрочного прогноза развития опасных явлений погоды, что является важной прикладной задачей.

В Российской Федерации наибольшей градоопасностью отличается регион Северного Кавказа. Исследования показали, что среднегодовые потери урожая в зоне ответственности Краснодарской, Ставропольской и Северо-Кавказской противоградовых служб за контрольный 10-летний период превышали 5 % (Абшаев и др., 2022). Неудивительно, что большинство исследований проводится именно для облаков этого района. Так, в последние годы выполнена серия работ по анализу статистических характеристик градовых облаков Северного Кавказа (Инюхин, 2017; Аппаева, 2020). В Северо-Западном регионе град выпадает достаточно редко и обычно не сопровождается сильными разрушениями (Научно-прикладной справочник... / электронный ресурс), при этом в некоторых случаях одновременно с градом наблюдаются шквалы, смерчи и сильные ливни. Особенности отдельных градовых облаков региона

рассмотрены в ряде работ авторов настоящей статьи (Довгалюк и др., 2018; 2019; Торопова и др., 2022).

Задачей настоящей работы является исследование структуры облаков, формирующих град на Северо-Западе Российской Федерации, а также определение радиолокационных характеристик градовых облаков.

1. Данные для анализа

Использованы данные, полученные с помощью доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С, работающего на длине волны 5,3 см и позволяющего проводить измерения на двух ортогональных поляризациях. Радиолокатор установлен в пос. Воейково (Ленинградская область) в 10 км к востоку от Санкт-Петербурга. За 10 мин осуществляется два радиолокационных обзора. Один из них обеспечивает измерение поляризационных характеристик облаков (радиолокационной отражаемости на горизонтальной и вертикальной поляризациях, дифференциальной фазы, коэффициента кросс-корреляции), во время второго, помимо поляризационных, выполняются измерения радиальной скорости и ширины доплеровского спектра радиальных скоростей. Для обработки и визуализации данных ДМРЛ-С применялось программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации «ГИМЕТ-2010».

Из данных наблюдений за 2017–2022 гг. были выбраны 16 дней, когда град у подстилающей поверхности фиксировался наблюдателями (данные наблюдений авторов статьи) и проводились радиолокационные измерения характеристик градовых облаков (данные метеостанций). Выбирались только те облака, из которых град выпадал непосредственно в месте наблюдения. После критического анализа всех данных количество анализируемых дней с градом было сокращено до 8. В ряде случаев град выпадал в течение достаточно продолжительного времени, что позволило использовать при анализе 32 обзора радиолокатора.

Анализ радиолокационных данных показал, что по условиям формирования и характеристикам градовые облака могут условно быть разбиты на 2 группы: облака, формирующиеся в осенне-весенний период (май, сентябрь) и летние облака (июнь–август).

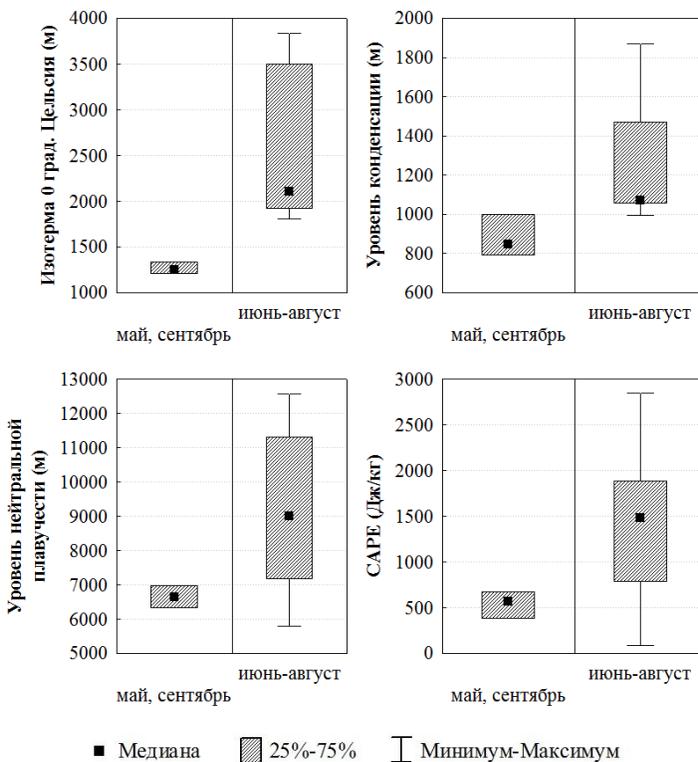


Рис. 1. Характеристики строения и неустойчивости атмосферы в дни выпадения града: высота изотермы 0 °С, уровень конденсации, уровень нейтральной плавучести (уровень конвекции), доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE)

Для переходного периода в дни с выпадением града для облаков характерны: небольшая высота изотермы 0°C (ниже 1,5 км), расположение уровня конденсации на высоте около 1 км, а уровня нейтральной плавучести — на высоте не более 7 км, доступная конвективная энергия неустойчивости CAPE — менее 1000 Дж/кг.

При формировании градовых облаков в летний период изотерма 0°C располагалась выше уровня 1,5 км (а в некоторых случаях выше 3 км); уровень конденсации составлял 1–2 км, уровень нейтральной плавучести находился на высотах 7–11 км (в отдельных случаях и выше), энергия неустойчивости CAPE не достигала 3000 Дж/кг (рис. 1).

Облака переходного периода (первая группа) анализировались по данным за 3 дня: 3 сентября 2022, 3 сентября 2021, 19 мая 2020 г. Их мощность была относительно небольшой, а верхняя граница располагалась в некоторых случаях на высотах 5–7 км.

По наблюдениям авторов установлено, что в переходный период в исследуемом районе достаточно часто наблюдаются облака, из которых выпадает крупа. В ряде случаев размер крупинки превышает принятый порог в 5 мм, что позволяет классифицировать такие осадки как град.

Во вторую группу (облака летнего периода) были отнесены данные за 5 дней: 18 июня 2020, 9 июня 2020, 22 июля 2017, 18 июля 2017, 25 мая 2017 г. Высота верхней границы таких облаков могла превышать 10 км, диаметр градин достигал 1–2 см.

2. Микрофизическая структура облаков

На рисунке 2 приведены радиолокационные сечения облаков, иллюстрирующие их микрофизическое строение, полученное по методике, описанной в работе (Dolan et al., 2013). На рис. 2а представлен вертикальный разрез облака (верхняя граница облака составляет 5,4 км), которое относится к первой группе облаков, а на рис. 2б — ко второй (верхняя граница находится на высоте 7,0 км).

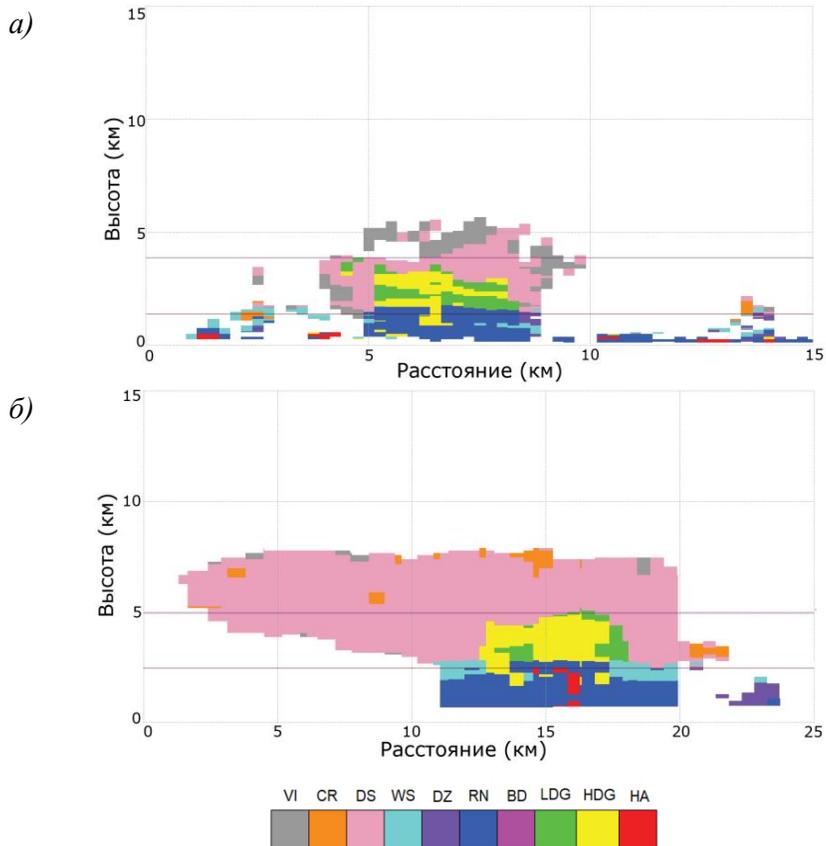


Рис. 2. Микрофизическое строение облаков первой (а) и второй (б) групп:
 VI – вертикальные ледяные кристаллы, CR – ледяные кристаллы,
 DS – сухой снег, WS – тающий снег, DZ – морось, RN – дождь,
 BD – большие капли/тающий град, LDG – крупа с низкой плотностью,
 HDG – крупа с высокой плотностью, HA – град

По данным наблюдателей в первом случае размер градовых частиц лишь немного превышал пороговое значение по отношению к крупе. В то же время расчеты по методике (Dolan et al., 2013) показали, что в центральной части располагается зона осадков протяженностью

0,5–1 км, включающая не град, а частицы крупы. При этом горизонтальная протяженность облака составляла около 4 км. Частицы крупы, высокой и низкой плотности, определяемые по методике (Dolan et al., 2013), занимают значительную часть в облаке, располагаясь, в основном, между изотермами 0 и -15°C . Выше фиксируется область с ледяными кристаллами.

Второй группе соответствует кучево-дождевое облако с вытянутой наковальной. В центральной части облака регистрируется достаточно узкая область с выпадающим градом, ее ширина составляет 0,5–1 км. В нижней части облака располагается обширная область осадков, имеющая протяженность около 9 км. Важно подчеркнуть, что область с градовыми осадками занимает лишь 5–10 % от всей длины зоны осадков. Выше располагаются частицы крупы, занимающие примерно половину облака, и находящиеся, в основном, также между изотермами 0 и -15°C . Протяженность области с крупой примерно равна 5 км. Еще выше присутствуют частицы сухого снега (видимо это кристаллическая часть облака).

3. Статистические характеристики градовых облаков

Ниже приводятся характеристики облаков, из которых фиксировалось выпадение града диаметром от 5 до 20 мм. Значения радиолокационных параметров получены с использованием специально разработанной программы. Облака выделялись по контуру радиолокационной отражаемости 45 дБZ. Основные статистические радиолокационные характеристики облаков представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Высота уровня отражаемости 5 дБZ менялась в пределах от 4,3 до 16,7 км. Медианное значение составило 9,5 км. Обычно данный уровень (5 дБZ) располагается вблизи верхней границы облака. Из результатов измерений установлено, что он превосходит 9 км в 57 % случаев. Отмеченное максимальное значение 16,7 км не соответствует реальной высоте облака, а связано с погрешностью измерений радиолокатора за счет наличия боковых лепестков

диаграммы направленности антенны при большой отражаемости от облака (Методические указания, 2019).

Таблица 1

**Статистические характеристики облаков,
из которых наблюдалось выпадение града**

Характеристика	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
Максимальная отражаемость, Z_m , дБZ	57,3	58,0	45,5	66,0	6,5
Высота уровня максимальной отражаемости, H_{Z_m} , км	1,6	1,3	0,6	4,2	0,77
Высота уровня отражаемости 5 дБZ, км	9,1	9,5	4,3	16,7	3,5
Объем облака с дождем, км ³	43,7	25,2	0	147	46,7
Объем облака с крупой, V_{GR} , км ³	73,4	13,8	0,76	273	95,9
Объем облака с градом, V_H , км ³	8,6	0	0	56,1	19,2
Максимальная интенсивность осадков, мм/ч	123	92,9	25,4	315	105
Объем переохлажденной части облака с отражаемостью более 50 дБZ, км ³	19,8	0,47	0	115	38,5

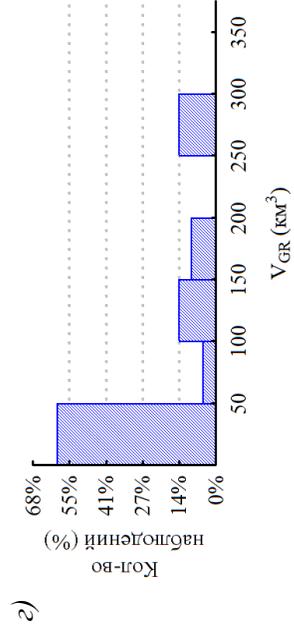
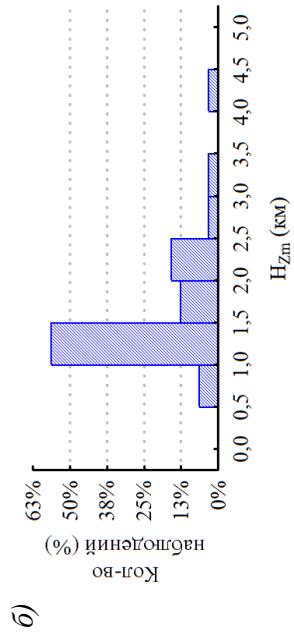
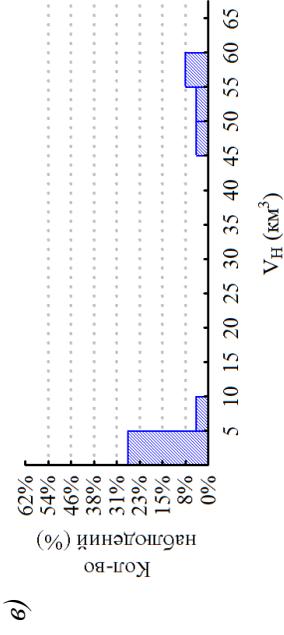
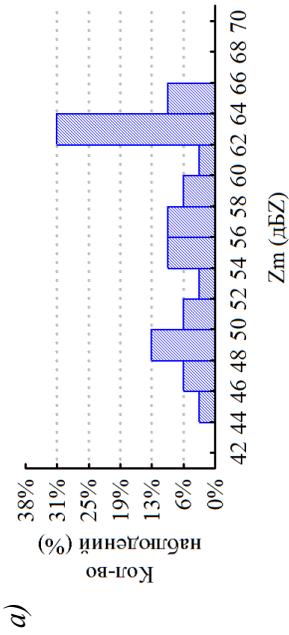


Рис. 3. Гистограммы распределения исследуемых характеристик: *a)* максимальная отражаемость в облаке Z_m , *б)* высота уровня максимальной отражаемости H_{Zm} , *в)* объем облака с градом V_H , *г)* объем облака с крупной V_{GR}

Максимальная отражаемость Z_m от облаков менялась в широких пределах — от 45,5 до 66 дБZ. Одним из критериев появления града в облаке является максимальное значение радиолокационной отражаемости. Согласно РД 52.37.731-2010 при переходе облака в опасное явление второй категории (градоопасные облака) отражаемость должна превышать 45 дБZ. Для всех исследованных облаков это условие выполнялось. Для части из них отражаемость соответствовала 3–4 категории опасности, т. е. случаям с выпадением града. Распределение значений максимальной отражаемости (рис. 3а) носит неравномерный характер, что обусловлено ограниченным количеством рассмотренных случаев. Максимальная отражаемость достигала 66 дБZ, медиана распределения — 58 дБZ.

Высота уровня максимальной отражаемости H_{Z_m} располагалась в нижней части облака (ниже нулевой изотермы) в 69 % случаев (рис. 3б). Это указывает на то, что большие значения отражаемости могли быть также обусловлены появлением водяной пленки на ледяных частицах и жидкокапельными осадками (Степаненко, Гальперин, 1983). В 38 % случаев отсутствовали области с отражаемостью более 50 дБZ в переохлажденной части облака. Это также указывает на то, что в значительной части облаков наибольшие значения отражаемости фиксировались в их нижней части.

В 68 % случаев интенсивность осадков, полученная из данных зондирования радиолокатором, превосходила 50 мм/ч. При этом следует иметь в виду, что измерения интенсивности осадков радиолокационным методом в случае наличия града имеют существенные погрешности (Синькевич и др., 2023).

Из представленных данных видно, что объем с крупой V_{GR} в среднем существенно (почти на порядок) превышает объем облака с градом V_H , что обусловлено особенностями расчета соответствующих объемов. Можно полагать, что часть объемов с градом ошибочно относится к объему с крупой. Видимо, это связано с тем, что размер градовых частиц в облаках Северо-Запада Российской Федерации во многих случаях невелик и близок к размеру крупы.

Расчеты показали, что коэффициенты корреляции Спирмена, рассчитанные с уровнем значимости $p < 0,05$, оказались равными между объемом облака с градом и площадью облака — 0,76, максимальной отражаемостью — 0,77, высотой уровня отражаемости 5 дБЗ — 0,71, максимальной интенсивностью осадков — 0,70, потоком осадков — 0,76, объемом облака с крупой — 0,81, переохлажденным объемом облака с отражаемостью 45 дБЗ и 50 дБЗ — 0,87 и 0,88 соответственно.

Высокие значения коэффициента корреляции были получены между объемом облака с крупой и площадью облака — 0,94, максимальной отражаемостью — 0,83, с высотой уровня отражаемости 5 дБЗ — 0,87, максимальной интенсивностью осадков — 0,78, потоком осадков — 0,90, переохлажденным объемом облака с отражаемостью 45 дБЗ и 50 дБЗ — 0,97 и 0,88.

Из этих данных следует, что одним из важных индикаторов града в облаке может быть объем части облака с отражаемостью более 45 дБЗ. В рассмотренных случаях его минимальное значение составило $0,4 \text{ км}^3$.

Выводы

Впервые для Северо-Западного региона Российской Федерации получены статистические радиолокационные характеристики облаков, из которых выпадал град, непосредственно фиксируемый наземными наблюдателями. Рассмотрена микрофизическая структура этих облаков.

Град наблюдался в переходный период (май, сентябрь) и летом (июнь–август). В первом случае размер града был близок к крупе, во втором случае — достигал 2 см. Указанные периоды характеризуются существенными различиями в строении атмосферы — летом наблюдается более высокое расположение изотермы 0°C и большие значения энергии неустойчивости CAPE. Микрофизическая структура облаков обоих периодов показала наличие достаточно обширной области с крупой в центральной части

облака. Горизонтальные размеры градовых осадков невелики и не превышали 1 км.

Высота верхней границы облаков (по уровню отражаемости 5 дБZ) составляла не менее 4,3 км, а в 57 % случаев – более 9 км. Максимальная отражаемость Z_m от облаков изменялась от 45,5 до 66 дБZ. Объем облака с крупой и градом вычислялся по методике (Dolan et al., 2013), где используются поляризационные измерения ДМРЛ-С. Объемы облака с крупой в целом существенно превышали объемы облака с градом. Выполненный статистический анализ показал, что объем облака с градом хорошо коррелирует с переохлажденными объемами облака с отражаемостью более 45 и 50 дБZ, которые могут служить индикаторами града в облаках Северо-Запада Российской Федерации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 22-27-20031) и Санкт-Петербургского научного фонда (Соглашение № 58/2022 от 15 апреля 2022 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М., Цыканов Х. А. (2022). Защита сельскохозяйственных растений от градобития на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. № 7. С. 11–27. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-7-11-27.

Алексеева А. А., Бухаров В. М., Лосев В. М. (2023). Диагностика града на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. № 2 (388). С. 114–127. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-2-114-127.

Аннаева Ж. Ю. (2020). Результаты статистических исследований основных характеристик грозо-градовых облаков по данным радиолокационных наблюдений // Труды ГГО. Вып. 598. С. 188–196.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Попов В. Б. (2019). Исследование динамики электрической структуры грозо-градового кучево-дождевого облака по данным трехмерного численного моделирования (на примере северо-запада России) // Труды ГГО. Вып. 592. С. 7–22.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Попов В. Б. (2018). Численное моделирование эволюции грозо-градового конвективного облака,

его электрической структуры и связанных с ним опасных явлений на северо-западе России // Труды ГГО. Вып. 590. С. 7–26.

Жараиуев М. В. (2012). Статистический анализ градовой активности в Ставропольском крае и Крыму // Метеорология и гидрология. № 7. С. 37–43.

Жараиуев М. В. (2021). Сопоставление статистических данных грозовой и градовой активности на территории Северного Кавказа // Труды ГГО. Вып. 603. С. 145–154.

Инюхин В. С., Макитов В. С., Куцев С. А. (2017). Радиолокационные исследования формирования и развития градовых очагов в мощных конвективных облаках // Метеорология и гидрология. № 7. С. 103–111.

Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. (2020). Прогноз града с заблаговременностью до трех суток по выходным данным глобальной модели атмосферы // Труды ГГО. Вып. 598. С. 204–214.

Кужевская И. В., Волкова М. А., Нечепуренко О. Е., Чурсин В. В. (2019). Климатология градовых процессов Юга Западной Сибири // VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству с международным участием, Нальчик, 23–27 сентября 2019 года. — СПб: Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского. С. 102–104.

Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике (2019). — Москва. 129 с.

Павлюков Ю. Б., Корнев Д. П., Травов А. В. (2018). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665447, Российская Федерация. Программный комплекс вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (шифр «ГИМЕТ-2010»), версия 02, № 2018662687, опубл. 05.12.2018 / заявитель ФГБУ «ЦАО».

Научно-прикладной справочник «Климат России». Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/climate/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-klimat-rossii> (дата обращения - 08.11.2023).

РД 52.37.731-2010 (2010). Организация и проведение противоградовой защиты. — Нальчик. 90 с.

Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Куров А. Б., Тарабукин И. А., Веремей Н. Е., Дмитриева О. А., Торсунаков Р. Е., Торопова М. Л. (2023). Характеристики конвективных облаков Северо-Запада России, формирующих интенсивные осадки // Оптика атмосферы и океана. Т. 36. № 08. С. 662–669. DOI: 10.15372/AOO20230806.

Степаненко В. Д., Гальперин С. М. (1983). Радиотехнические методы исследования гроз. — Л.: Гидрометеоиздат. 204 с.

Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Синькевич А. А. (2022). Электрическая структура и динамика грозоградового облака на северо-западе РФ по данным трехмерного моделирования // Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды: доклады IV международной научной конференции (Ставрополь, 23–25 мая 2022 г.) / под ред. Р. Г. Закияна. — Ставрополь: Изд-во СКФУ. С. 146-153.

Чернокульский А. В., Елисеев А. В., Козлов Ф. А., Коришнуова Н. Н., Курганский М. В., Мохов И. И., Семенов В. А., Швець Н. В., Шихов А. Н., Ярынич Ю. И. (2022). Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. № 5. С. 27–41. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.

Шихов А. Н., Абдуллин Р. К., Чернокульский А. В., Ажигов И. О., Ярынич Ю. И., Спрыгин А. А., Коренев Д. П. (2021). Создание картографической базы данных и веб-сервиса «Конвективные опасные метеорологические явления на территории Центрального федерального округа» // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Т. 27. № 3. С. 120–135. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-120-135.

Dolan B., Rutledge S. A., Lim S., Chandrasekar V., Thurai M. A (2013). Robust C-Band Hy-drometeor Identification Algorithm and Application to a Long-Term Polarimetric Radar Dataset // Journal of Applied Meteorology and Climatology. V. 52, Is. 9. P. 2162–2186.

УДК 551.594

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ДАННЫХ ДМРЛ И ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. В. Снегуров, В. С. Снегуров

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: info@alwes.ru

Поступила в редакцию 12.01.2023
Поступила после доработки 10.05.2023

Введение

В 2017 г. была проведена модернизация 14 индикаторов грозовой опасности (далее по тексту — индикаторы) версии «Alwes 7.04» аппаратно-программного комплекса (АПК) грозопеленгационной системы версии «Алвес 9.07.14» (ГПС_{alw}), функционирующих в центральной части России. Серверное оборудование АПК установлено на полевой экспериментальной базе ФГБУ «ГГО» в пос. Воейково. Модернизация позволила восстановить работоспособность значительной части индикаторов ГПС_{alw} региона, при этом была произведена замена антенн для приема электрической составляющей излучения молниевых разрядов (МР), установлено новое программное обеспечение и организован доступ в Интернет по каналам связи сотового оператора.

В 2019–2020 гг. в Московском регионе для расширения зоны контроля грозовой активности и повышения эффективности обнаружения МР в состав грозопеленгационной системы Вайсала (ГПС_{if}) были включены четыре новых датчика LS7002, размещенные к западу и северо-западу от существующей ГПС_{if}.

Цель настоящей работы состоит в установлении корреляционных связей между числом (N) и плотностью (ρ) МР, полученных ГПС_{alw} и ГПС_{lf} с количеством и плотностью опасных метеорологических явлений в радиусе до 200 км от ДМРЛ Внуково.

Методика обработки данных ДМРЛ

Для обработки и анализа исходной информации использовались распространяемые по каналам ВСС Росгидромета данные ГПС о грозовой активности и данные ДМРЛ о метеоявлениях. Рассматривались данные обеих ГПС и ДМРЛ за 2018 г. после модернизации и переподключения индикаторов ГПС_{alw} к сотовым операторам и данные за 2022 г. после расширения территории контроля грозовой активности ГПС_{lf}.

Для получения суммарного распределения количества опасных метеоявлений $N_{(оя)}$ в заданные интервалы наблюдений по данным ДМРЛ использовалось программное обеспечение версии «Rectm 9.7.20», которое позволяет выбирать из таблиц базы данных АПК ГПС_{alw} ячейки с метеоявлениями и суммировать их количество. В результате формируется файл, содержащий номер ДМРЛ, число метеоявлений в десятикилометровых интервалах и десятиградусных секторах.

В данном эксперименте формировалась выборка и проводилось суммирование ячеек с метеоявлениями от «конвективные осадки слабые» (три градации) до «град слабый» за грозовые сезоны 2018 и 2022 гг. Ячейки с метеоявлениями от № 13 («Град умеренный») до № 17 («Шквал сильный») при обработке не учитывались, поскольку их количество составило лишь от 0,2 до 0,6 % от выборки с метеоявлениями №№ 6–12 (рис. 1а).

Распределение числа ячеек (% от общего числа) с различными метеоявлениями по данным ДМРЛ за 2018 г. приведено на рисунке 1а. На цветовой шкале (рис. 1б,) цифрами указано количество ячеек с различными метеоявлениями, соответствующее каждому цвету на рисунках 2 а–в. Рисунки 2 а–в позволяют визуально оценить расстояния и направления, по которым наблюдалось наибольшее число

метеоявлений № 6 «Конвективные осадки слабые», № 8 «Конвективные осадки сильные» и № 10 «Гроза – 70–90 %».

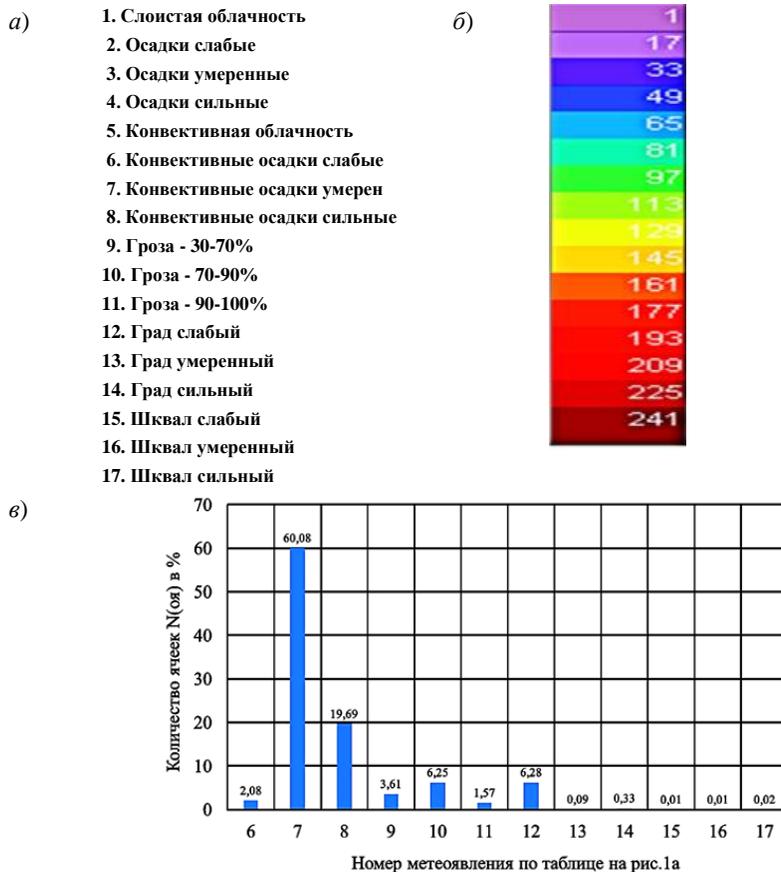


Рис. 1. Метеорологические явления (*a*), цветовая шкала числа ячеек метеорологических явлений (*б*), гистограмма распределения числа ячеек, %, с различными метеоявлениями по данным ДМРЛ за 2018 г. (*в*)

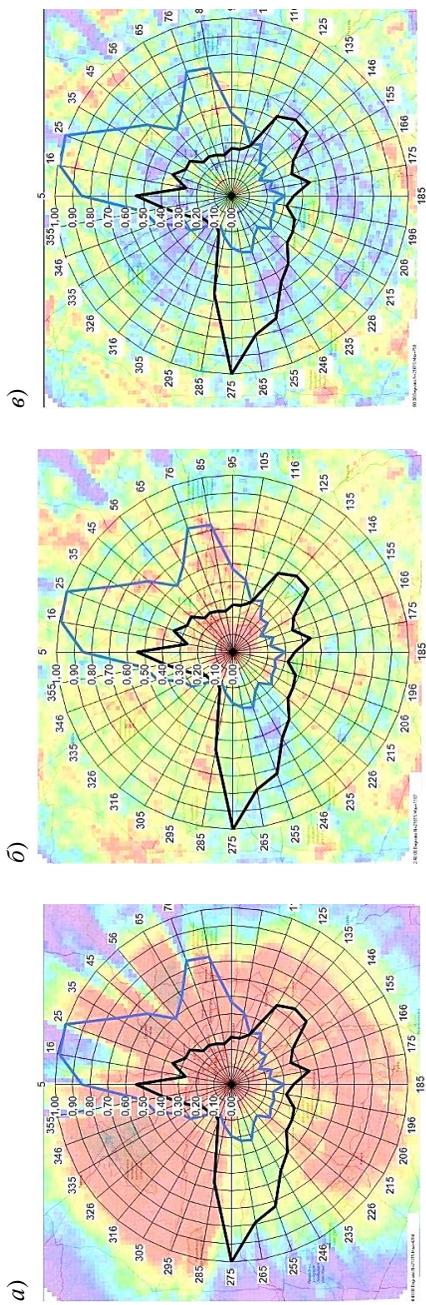


Рис. 2. Пример распределения числа метеоявлений «конвективные осадки» (а — № 6, б — № 8) и «грозы» (в — № 10) по данным ДМРЛ Внуково и нормированного числа МР по данным ГПС_{аиц} ($N_{(aiv)}/N_{max}$) и ГПС_{иц} ($N_{(if)}/N_{max}$ — черная кривая) за май–август 2018 г.

— $N_{(aiv)}/N_{max}$ — $N_{(if)}/N_{max}$

Например, более 160 случаев метеоявлений № 6 в ячейке на рисунке 2а наблюдаются на большей территории обзора ДМРЛ за 2018 г. Минимум метеоявлений № 6 приходится на юго-западное направление в зоне от 0 до 200 км. В северном направлении минимум наблюдается с расстояний 100 км

Сильные конвективные осадки (метеоявление № 8) носят очаговый характер (рис. 2б), их количество ячеек значительно меньше, чем в предыдущем случае (рис. 2а).

Грозы с вероятностью 70–90 % (метеоявление № 10 «Гроза 70–90 %») по данным ДМРЛ Внуково в 2018 г. чаще наблюдались на северо-востоке и на юге на удалениях от 180 до 200 км, на западе, северо-западе на аналогичных удалениях (рис. 2 в).

Преобладание желтых и красных пятен на рисунках 2а и 2б указывает на значительное число ячеек со слабыми и сильными конвективными осадками.

Распределения нормированных по максимуму чисел МР ($N_{(alw)}/N_{max}$ и $N_{(lf)}/N_{max}$), зарегистрированных ГПС_{alw} и ГПС_{lf}, заметно различаются (рис. 2). По данным ГПС_{alw} максимум МР зарегистрирован в северном, северо-восточном и восточном направлении, по данным ГПС_{lf} максимум наблюдается в западном и юго-западном направлении.

Для нормированных значений МР, зарегистрированных двумя ГПС, в мае–августе 2018 г. по шкале Чеддока (Chaddock, 1925) характерна слабая отрицательная корреляция (–0,22).

Связь данных ДМРЛ и ГПС в зависимости от направления

Плотность МР в каждом секторе не зависит от направления и определяется только числом разрядов $N_{(alw)}$ и $N_{(lf)}$.

Рассмотрим распределение коэффициентов корреляции между числом МР, зарегистрированных ГПС_{alw} ($N_{(alw)}$) и ГПС_{lf} ($N_{(lf)}$) с количеством метеоявлений $N_{(ос)}$ от «слабые конвективные осадки» (№ 6 в таблице на рис. 1а) до «град слабый» (№ 12 в таблице на рис. 1а) по 10-градусным секторам в зоне до 200 км от ДМРЛ Внуково за май–август 2018 и 2022 гг.

В обработке использовались данные всех типов молниевых разрядов: внутриоблачные, «облако–земля», «облако–облако».

Результаты (табл. 1) показывают, что высокой устойчивой корреляционной связи между числом МР и числом различных метеоявлений по десятиградусным секторам по данным обеих ГПС не наблюдается. Коэффициенты корреляции между числом МР $N_{(alw)}$ и числом метеоявлений $N_{(оя)}$, в основном составляют 0,42–0,45 в 2018 г. и 0,31–0,41 — практически со всеми метеоявлениями, за исключением случаев $N_{(оя_8 \text{ и } 12)}$, когда в 2022 г. наблюдалась слабая связь (0,28 и 0,17) с отрицательным знаком. Заметная связь (0,59–0,68) наблюдается только в 2018 г. между числом МР $N_{(alw)}$ и числом метеоявлений $N_{(оя_6_8)}$ (от «слабых» до «сильных» конвективных осадков) и $N_{(оя_9)}$ («Гроза 30–70 %»).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции $r_{(Nalwoя)}$ и $r_{(Nifоя)}$ между числом МР $N_{(alw)}$, $N_{(if)}$ по данным ГПС_{alw} и ГПС_{if} и количеством метеоявлений $N_{(оя)}$ по десятиградусным секторам за май–август 2018 и 2022 гг. в радиусе 200 км от ДМРЛ

Метеоявление, №	$N_{(alw)_18}$	$N_{(if)_ΣNs_18}$	$N_{(alw)_22}$	$N_{(if)_ΣNs_22}$
	2018		2022	
6	–0,59	0,42	–0,41	0,22
7	–0,65	0,09	–0,31	0,49
8	–0,59	0,09	–0,28	0,43
9	–0,68	0,13	–0,34	0,32
10	–0,45	0,04	–0,31	0,43
11	–0,45	0,04	–0,32	0,36
12	–0,42	0,23	–0,17	0,38

В 2018 г. между числом МР (N_{if}) и числом метеоявлений $N_{оя}$ наблюдается преимущественно слабая (N_{if}) корреляционная связь (от 0,09 до 0,23) и только между «слабыми» осадками $N_{(оя_6)}$ и числом МР $N_{(alw)}$ наблюдается умеренная корреляционная связь. В 2022 г. связь между числом МР (N_{if}) и $N_{(оя_7_12)}$ умеренная, а между (N_{if}) и $N_{(оя_6)}$ слабая.

Характерной особенностью ГПС_{lf} является использование гибридного метода расчета координат МР по данным двух, трех, четырех и более датчиков. Полученные в Московском регионе в 2018 г. данные двух, трех, четырех датчиков LS8000 и всех датчиков, участвующих в расчетах координат МР, позволяют провести их сравнение с результатами наблюдений ДМРЛ.

Многофакторный регрессионный анализ показал, что в 2018 и 2022 гг. для модели $N_{(alw)}$ от $N_{(оя\ 6_12)}$ значения R^2 составили соответственно 0,53 и 0,21, а для модели $N_{(lf)\ \Sigma N_s}$ от $N_{(оя\ 6_12)}$ 0,45 и 0,51, при ошибке аппроксимации от 37,3 до 69,9 %. Это говорит о том, что при сравнении данных по десятиградусным секторам в зоне до 200 км зафиксированные ДМРЛ метеоявления не являются основными факторами, определяющими интенсивность грозовой деятельности.

Количественная оценка доли влияния каждой независимой на зависимую переменную в многофакторном регрессионном анализе может быть получена с помощью дельта-коэффициента. При сравнении в качестве зависимых переменных принималось число МР, зарегистрированное в десятиградусных секторах ГПС_{alw} ($N_{(alw)}$) и ГПС_{lf} ($N_{(lf)\ \Sigma N_s}$), за независимые переменные — число метеоявлений от $N_{(оя\ 6)}$ (слабые конвективные осадки) до $N_{(оя\ 12)}$ (слабый град).

Оценим соотношение количества метеоявлений с умеренными, сильными осадками ($N_{(оя\ 6-8)}$), грозами и слабым градом ($N_{(оя\ 9-12)}$) с числом МР, зарегистрированных в десятиградусных секторах ГПС_{alw} $N_{(alw)}$ и ГПС_{lf} $N_{(lf)\ \Sigma N_s}$.

Расчеты показывают, что за 2018 и 2022 гг. 67 % МР $N_{(alw)}$ зарегистрированы ГПС_{alw} в ячейках, определяемых ДМРЛ, как конвективные осадки, в 33 % случаев — в ячейках, определяемых как грозы с различной вероятностью и слабый град.

В тот же период ГПС_{lf} регистрировала 83 % МР в ячейках с метеоявлениями, определяемых ДМРЛ, как конвективные осадки и в 17 % как грозы с различной вероятностью или слабый град.

Количество зарегистрированных ГПС_{lf} МР зависит от ее эффективности, определяемой числом датчиков N_s , участвующих в расчетах координат, их чувствительностью, местоположением и диаграммой «приема» ЭМИ МР. Диаграмма «приема» также зависит от количества датчиков, направления на источник ЭМИ и величины тока МР (Снегуров, Снегуров, 2021).

Примеры взаимной связи между данными только 2-х $N_{(lf_Ns2)}$, 3-х $N_{(lf_Ns3)}$, 4-х $N_{(lf_Ns4)}$ датчиков и их общего числа $N_{(lf_ΣNs)}$, четырехпунктовой ГПС_{lf} в десятиградусных секторах по различным направлениям на удалении до 200 км представлены на рисунке 3.

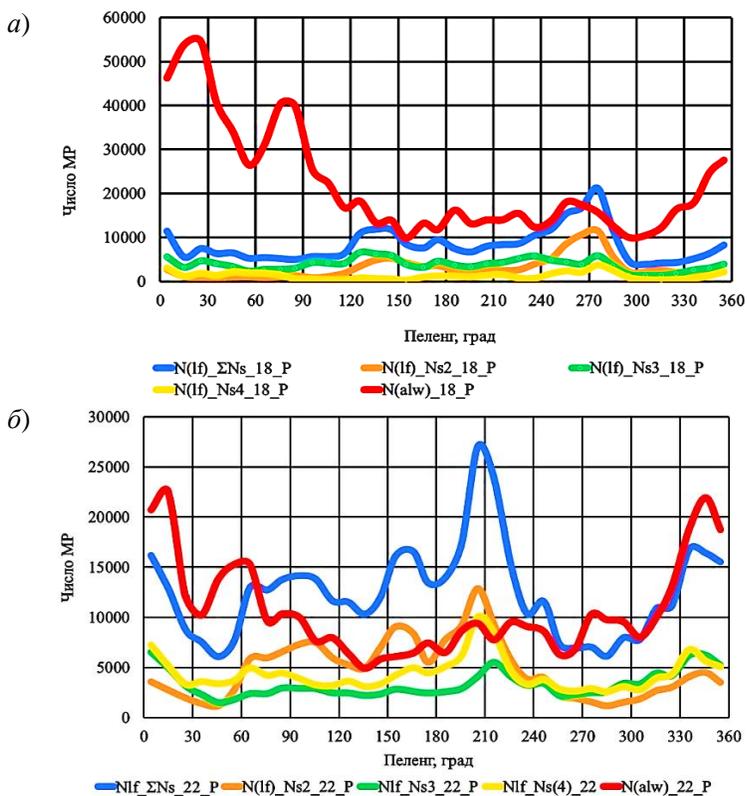


Рис. 3. Распределение числа МР зарегистрированных всеми датчиками ГПС_{lf} $N_{(lf_ΣNs)}$, только двумя $N_{(lf_Ns2)}$, тремя $N_{(lf_Ns3)}$ и четырьмя $N_{(lf_Ns4)}$ и числа МР, зарегистрированных индикаторами ГПС_{alw} $N_{(alw)}$ в десятиградусных секторах в зоне до 200 км за май–август 2018 (а) и 2022 г. (б)

В 2018 г. максимум $N_{(lf_ΣNs)max} = 21170$ МР (100 %), зарегистрированных всеми датчиками ГПС_{lf}, наблюдается в секторе от 271 до 280 градусов (рис. 3а). На этот сектор приходится максимум

MP $N_{(lf_Ns2)max} = 11586$ (55 %), обнаруженных только двумя датчиками. Три и четыре датчика участвовали в расчетах координат и токов MP соответственно в 5851 (28 %) и 3733 (18 %) случаях. Коэффициент корреляции между общим числом MP $N_{(lf_ΣNs)}$ и количеством MP, зарегистрированных только двумя датчиками $N_{(lf_Ns2)}$ в указанном секторе равен 0,92. Для пар $N_{(lf_ΣNs)}$, $N_{(lf_Ns3)}$ и $N_{(lf_ΣNs)}$, $N_{(lf_Ns4)}$ коэффициент составил 0,69 и 0,61. В остальных случаях (пары $N_{(lf_Ns2)}$ и $N_{(lf_Ns3)}$, $N_{(lf_Ns2)}$ и $N_{(lf_Ns4)}$, $N_{(lf_Ns3)}$ и $N_{(lf_Ns4)}$) он не превышает 0,46.

Максимум MP зарегистрирован двумя датчиками в секторе 271–280 градусов. Максимумы MP, зарегистрированные тремя и четырьмя датчиками, приходятся на другие сектора (рис. 3).

Всего за май–август 2018 г. ГПС_{lf} зарегистрировано 299688 (100 %) MP, из них двумя датчиками — 112833 (38 %), тремя — 139192 (46 %) и четырьмя — 47663 (16%) MP. График распределения числа MP N_{alw_18} приведен на рисунке 3а.

ГПС_{alw} за май–август 2018 г. зарегистрировала 794009 MP, что в 2,65 раза больше, чем ГПС_{lf}.

В 2022 г. после увеличения числа датчиков N_s ГПС_{lf} в западном, северо-западном направлении зона контроля грозовой активности увеличилась, что в определенной степени сказалось на увеличении эффективности ГПС_{lf} в радиусе 200 км от ДМРЛ. В результате соотношение между числом MP, зарегистрированных ГПС_{lf} и ГПС_{alw}, изменилось.

За май–август 2022 в зоне до 200 км от ДМРЛ ГПС_{lf} зарегистрировано 452493, а ГПС_{alw} — 385545 MP (85 % от ГПС_{lf}). Распределение числа MP, зарегистрированных всеми $N_{(lf_ΣNs)}$, только двумя $N_{(lf_Ns2)}$, тремя $N_{(lf_Ns3)}$ и четырьмя и более $N_{(lf_Ns4)}$ датчиками ГПС_{lf} и индикаторами ГПС_{alw} $N_{(alw)}$ в десятиградусных секторах в зоне до 200 км за май–август 2022 г. приведено на рисунке 3б.

Если в 2018 г. наблюдалась слабая отрицательная корреляционная связь между числом MP $N_{(alw)}$ и $N_{(lf_ΣNs)}$ (-0,22), в 2022 г. она осталась слабой (0,11), но изменила знак. Общее число MP $N_{(lf_ΣNs)} = 452493$ коррелирует с числом MP двух $N_{(lf_Ns2)} = 173889$, трех $N_{(lf_Ns3)} = 119893$ и четырех и более датчиков $N_{(lf_Ns4)} = 158712$ с коэффициентами 0,84, 0,54 и 0,90, соответственно. Увеличение числа MP $N_{(lf_Ns4)}$ в 2022 г. до 173889 обусловлено расширением зоны контроля грозовой активности. В это число вошли случаи регистрации MP четырьмя и более

датчиками, а в 2018 г. учитывалось число МР от четырех датчиков ГПС_{1f} ($N_{1f_Ns4} = 47663$ МР).

Распределение средних абсолютных значений токов МР ABS(I_{1f}) по разным направлениям за 2018 г. приведено на рисунке 4а, из которого следует, что два датчика регистрируют МР с меньшими токами, чем три и четыре датчика.

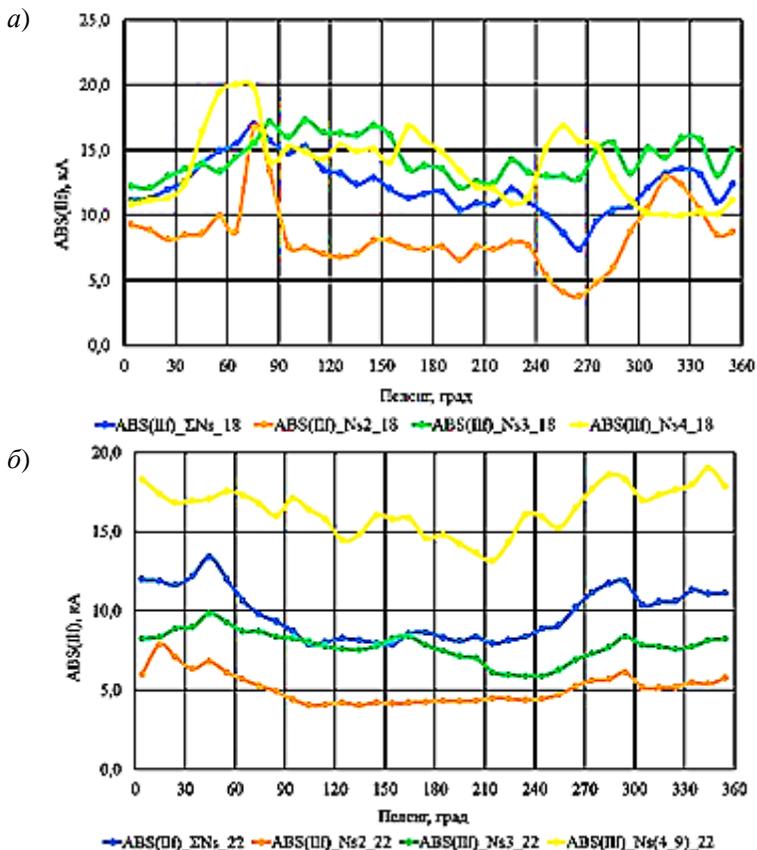


Рис. 4. Распределение средних абсолютных значений токов МР ABS(I_{1f}), зарегистрированных всеми ABS(I_{1f})_Σ, только двумя ABS(I_{1f})₂, тремя ABS(I_{1f})₃ и четырьмя ABS(I_{1f})₄ датчиками ГПС_{1f} в десятиградусных секторах в зоне до 200 км за май–август 2018 (а) и 2022 (б) г.

Минимальные значения $ABS(I_{(lf)})_{\Sigma N_s}$ наблюдаются в секторе от 251 до 280 градусов с абсолютным минимумом по направлению 270 градусов. В близком к этому направлению наблюдается максимум числа МР $N_{(lf), N_s(2)_{18}}$. Коэффициенты корреляции между парами $ABS(I_{(lf)})_{\Sigma N_s_{18}}$ и $ABS(I_{(lf)})_{N_s(2)_{18}}$, $ABS(I_{(lf)})_{\Sigma N_s_{18}}$ и $ABS(I_{(lf)})_{N_s(3)_{18}}$, $ABS(I_{(lf)})_{\Sigma N_s_{18}}$ и $ABS(I_{(lf)})_{N_s(4)_{18}}$ равны соответственно 0,72, 0,59 и 0,30. Распределение средних абсолютных значений токов МР $ABS(I_{(lf)})_{\Sigma N_s}$ по разным направлениям за 2022 г. отличается тем, что ток $ABS(I_{(lf)})_{N_s(4_9)22}$ значительно больше тока, рассчитанного по двум и трем датчикам ГПС_{lf}. Это обусловлено тем, что в расчетах $ABS(I_{(lf)})_{N_s(4_9)22}$ использовались данные от четырех до девяти датчиков. Сравнение коэффициентов корреляции между количеством МР $N_{(lf)}$ по данным различного числа датчиков ГПС_{lf} и числом метеоявлений $N_{(оя)}$ по данным ДМРЛ за май–август 2018 и 2022 гг. показывает их различие (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между количеством МР $N_{(lf)}$ по данным различного числа датчиков ГПС_{lf} и числом $N_{(оя)}$ по десятиградусным секторам за май — август 2018 и 2022 гг.

Метеоявление, №	Количество датчиков ГПС _{lf} , участвующих в расчетах координат и токов МР							
	все		два		три		четыре	
	2018	2022	2018	2022	2018	2022	2018	2022
6	0,42	0,22	0,46	0,24	0,30	0,00	0,02	0,16
7	0,09	0,49	0,24	0,45	-0,11	0,16	-0,12	0,46
8	0,09	0,43	0,23	0,40	-0,14	0,13	-0,07	0,40
9	0,13	0,32	0,27	0,29	-0,06	0,12	-0,14	0,29
10	0,04	0,43	0,04	0,40	0,16	0,16	-0,21	0,37
11	0,04	0,36	0,04	0,34	0,17	0,12	-0,21	0,31
12	0,23	0,38	0,15	0,25	0,41	0,25	-0,10	0,39

Примечание. В 2022 г. расчеты проведены для четырех и более датчиков $N_s(4_9)22$.

В 2018 г. умеренная корреляционная связь (0,3–0,5) между числом МР, числом метеоявлений $N_{(оя_6)}$ («слабые конвективные осадки») и числом метеоявлений $N_{(оя_6)}$ и $N_{(оя_12)}$ («слабый град») соответствует случаям регистрации МР двумя и тремя датчиками.

Полученные данные показывают, как по мере увеличения абсолютных средних значений токов $ABS(I_{if})$, увеличивается число датчиков N_s , участвующих в расчетах координат и токов МР, что в свою очередь, приводит к снижению погрешности измерений $\sigma(N_s)_{cp}$ (рис. 5).

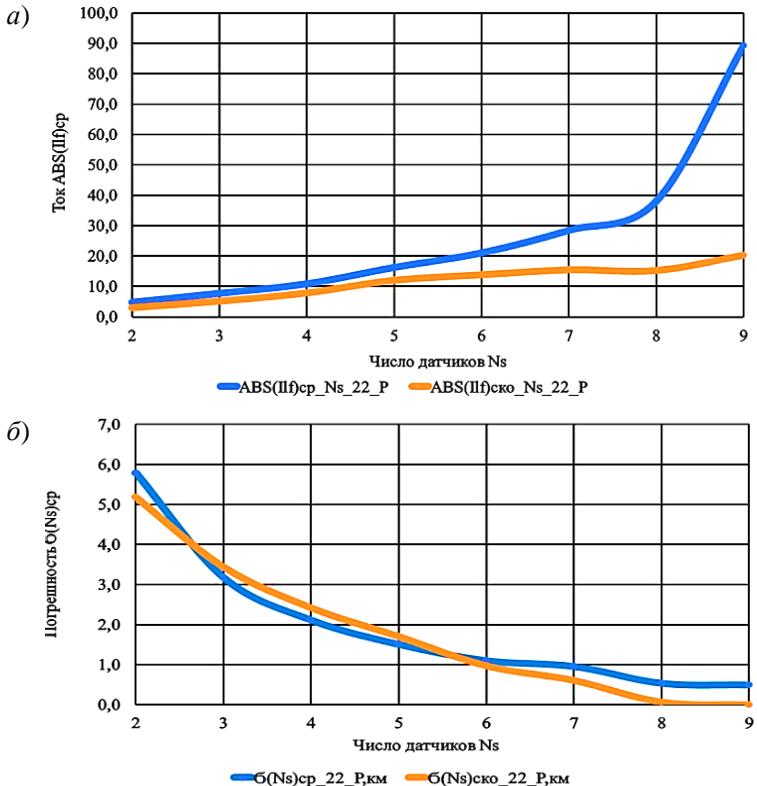


Рис. 5. Связь между числом датчиков N_s , участвующих в расчетах координат и токов МР, с абсолютными средними значениями тока МР $ABS(I_{if})_{cp}$ (а) и средними значениями погрешности измерений $\sigma(N_s)_{cp}$ (б).

Это происходит из-за перехода от комбинированного (пеленг-гипербола) метода расчета координат и токов МР, когда расчеты ведутся по данным двух или трех датчиков, к гиперболическому методу, когда в расчетах участвуют данные четырех и более датчиков.

В остальных случаях наблюдалась слабая корреляция (0,1–0,3) или ее отсутствие. В 2022 г. коэффициенты корреляции 0,32–0,49 наблюдались между числом МР $N_{(lf_Ns(1-9))}$ всех датчиков и $N_{(оя_7-12)}$, кроме $N_{(оя_6)}$ (0,22) (табл. 2). Умеренная корреляция наблюдалась в 2022 г. в случаях регистрации МР двумя датчиками с $N_{(оя_7,8,10,11)}$, четырьмя и более датчиками с $N_{(оя_7,8,10,11,12)}$. Между числом МР по трем датчикам и числом метеоявлений $N_{(оя_6-12)}$ наблюдалась слабая корреляция или ее отсутствие.

Характерной особенностью корреляции средних абсолютных значений тока МР $ABS(I_{(lf)})_{cp}$ с числом метеоявлений по данным ДМРЛ и случаев сравнения коэффициентов только двух, трех и четырех датчиков ГПС_{lf}, с количеством метеоявлений $N_{(оя)}$ является ее отрицательный знак (табл. 3).

Если сравнивать средние для всех метеоявлений значения коэффициентов корреляции, можно отметить, что они близки для всех датчиков ГПС_{lf} за 2018 и 2022 гг. (–0,31 и –0,32), для двух датчиков они отличаются в 1,5 раза, для трех датчиков 2,56 и четырех и более датчиков 3,2 раза.

Полученные результаты обработки данных ГПС и ДМРЛ по десятиградусным секторам указывают на регистрацию ГПС молниевых разрядов не только в облаках классифицируемых как грозовые с различной вероятностью и слабым градом (число метеоявлений $N_{(оя_9-12)}$), но и в облаках с конвективными осадками различной интенсивности $N_{(оя_6-8)}$.

Низкие коэффициенты детерминации R^2 (от 0,2 до 0,5) и высокие значения погрешности (от 32 до 70 % оценки моделей зависимых переменных (число МР $N_{(alw)}$ по данным ГПС_{alw}, суммарное число МР $N_{(lf_ΣNs)}$, число МР координаты которых вычислены по данным двух $N_{(lf_Ns2)}$, трех $N_{(lf_Ns3)}$, четырех и более датчиков $N_{(lf_Ns4}$ ГПС_{lf}), сгруппированных по десятиградусным секторам, от независимых переменных (число метеоявлений от слабых конвективных осадков

$N_{\text{оя}(6)}$ до слабого града $N_{\text{оя}(12)}$) многофакторного регрессионного анализа указывают на низкое качество рассмотренных моделей.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между средними абсолютными значениями токов МР $ABS(I_{\text{MP}})_{\text{ср}}$, рассчитанными по данным различного числа датчиков ГПС_Г, и количеством метеоявлений $N_{\text{оя}}$ за май–август 2018 и 2022 гг.

Метеоявление, №	Количество датчиков ГПС _Г , участвующих в расчетах координат и токов МР							
	Все варианты		два		три		четыре	
	2018	2022	2018	2022	2018	2022	2018	2022
6	-0,53	-0,50	-0,45	-0,47	-0,30	-0,89	0,02	-0,55
7	-0,40	-0,35	-0,19	-0,34	-0,17	-0,41	-0,32	-0,49
8	-0,33	-0,27	-0,14	-0,27	-0,11	-0,28	-0,27	-0,39
9	-0,42	-0,25	-0,21	-0,27	-0,16	-0,35	-0,26	-0,35
10	-0,15	-0,36	-0,16	-0,36	-0,12	-0,33	-0,09	-0,46
11	-0,12	-0,33	-0,19	-0,37	-0,08	-0,33	-0,03	-0,41
12	-0,23	-0,17	-0,31	-0,22	-0,16	-0,25	-0,04	-0,30
Среднее	-0,31	-0,32	-0,23	-0,33	-0,16	-0,41	-0,14	-0,42

Примечание. В 2022 г. расчеты велись для четырех и более датчиков $N_{\text{с}(4_9)22}$.

Отсутствие надежных корреляционных связей между рассмотренными параметрами можно объяснить естественным распределением гроз и метеоявлений $N_{\text{оя}}$ по десятиградусным секторам на контролируемой ГПС.

Нельзя также исключать влияние возможных изменений аппаратно-программных настроек измерительных комплексов, связанных, в частности, с изменениями пороговых значений критериев оценки метеоявлений и/или изменением эффективности регистрации МР в процессе эксплуатации ДМРЛ и ГПС.

Корреляционная связь данных ДМРЛ и ГПС в зависимости от расстояния

В каждом десятикилометровом интервале по мере увеличения расстояния, увеличивается площадь возможной грозовой активности и, как следствие, наблюдается рост числа МР, регистрируемых обеими ГПС, и числа метеоявлений по данным ДМРЛ. Графики на рисунке 6 иллюстрируют распределение нормированного по максимуму числа МР, зарегистрированных ГПС_{alw} и ГПС_{lf} в мае–августе 2018 и 2022 гг. на различных расстояниях в зоне до 200 км.

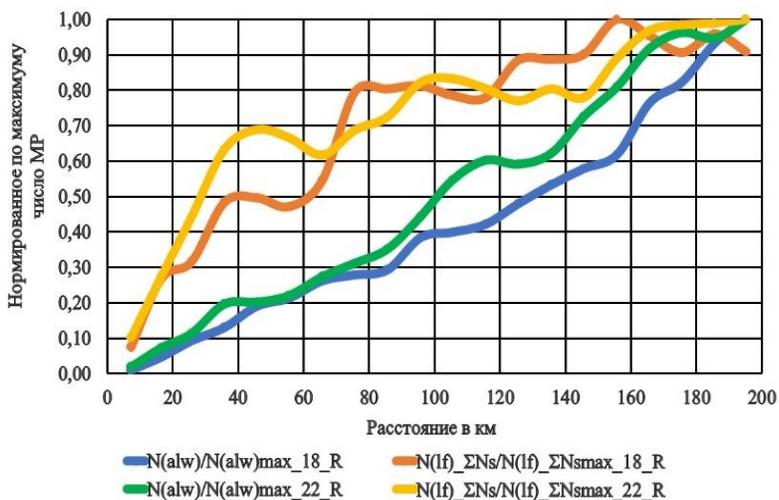


Рис. 6. Распределение нормированных по максимуму числа МР, зарегистрированных ГПС_{alw} и ГПС_{lf} в мае–августе 2018 г.

($N_{(alw)}/N_{(alw)max_18_R}$, $N_{(lf)_Ns}/N_{(lf)_Nsmax_18_R}$) и 2022 года ($N_{(alw)}/N_{(alw)max_22_R}$, $N_{(lf)_Ns}/N_{(lf)_Nsmax_22_R}$) на различных расстояниях в зоне до 200 км от ДМРЛ

Структура ГПС_{alw} в рассматриваемые годы не менялась. Вид зависимости $N_{(alw)}$ от расстояния в 2022 г. практически не отличается от аналогичной зависимости 2018 г. Обе кривые на рис. 6 аппроксимируются соотношениями вида:

$$N_{(alw)}/(N_{(alw)max_18_R}) = 0,0012 \cdot (R_{alwlf})^{1,25} \quad R^2 = 0,98 \quad (3)$$

$$N_{(alw)}/(N_{(alw)max_22_R}) = 0,0025 \cdot (R_{alwlf})^{1,14} \quad R^2 = 0,99 \quad (4)$$

Коэффициенты корреляции нормированных значений количества МР $N_{(alw)}/N_{(alw)max_18_R}$ и $N_{(lf)_Ns}/N_{(lf)_Nsmax_18_R}$ в 2018 г. составили 0,84, а в 2022 г. — 0,88 (для $N_{(alw)}/N_{(alw)max_22_R}$ и $N_{(lf)_Ns}/N_{(lf)_Nsmax_22_R}$).

Изменение структуры ГПС_{lf} к 2022 г. не повлияло на зависимость числа МР $N_{(lf)_Ns}$ от расстояния R_{alwlf} : в 2018 и 2022 гг. она аппроксимируется логарифмическими уравнениями:

$$N_{(lf)_Ns}/(N_{(lf)_Nsmax_18_R}) = 0,29 \cdot \ln(R_{alwlf}) - 0,57 \quad R^2 = 0,94 \quad (1)$$

$$N_{(lf)_Ns}/(N_{(lf)_Nsmax_22_R}) = 0,26 \cdot \ln(R_{alwlf}) - 0,39 \quad R^2 = 0,94 \quad (2)$$

Различие между кривыми для ГПС_{lf} и ГПС_{alw} состоит в том, что интенсивность грозовой активности в 2018 г. по данным ГПС_{lf} достигает максимума на удалении 155 км и далее снижается, а в 2022 г. максимум приходится на расстояние 200 км, что связано с расширением зоны действия ГПС_{lf}.

На рисунке 7 приведены корреляционные графики между нормированным числом МР $N_{(lf)_Ns}/(N_{(lf)_Nsmax_18})$ и $N_{(alw)}/(N_{(alw)max_18})$ за 2018 и 2022 г., которые аппроксимируются логарифмическими уравнениями (5) и (6) с коэффициентами детерминации $R^2 = 0,89$ и $0,95$.

$$N_{(lf)_Ns}/N_{(lf)_Nsmax_18} = 0,22 \cdot \ln(N_{(alw)}/N_{(alw)max_18}) + 0,98 \quad (5)$$

$$N_{(lf)_Ns}/N_{(lf)_Nsmax_22} = 0,22 \cdot \ln(N_{(alw)}/N_{(alw)max_22}) + 0,96 \quad (6)$$

Таким образом, значительного различия между тенденциями развития грозовой активности за 2018 и 2022 гг. по данным ГПС_{alw} и ГПС_{lf} годы не наблюдается. Как отмечалось выше, существенно изменилось количество МР, зарегистрированных ГПС_{alw} и ГПС_{lf}: если в 2018 г. число МР отличалось в 2,65 раза, то в 2022 г. отношение составило 0,85. Это связано с расширением зоны контроля грозовой активности ГПС_{lf} и, возможно, снижением эффективности ГПС_{alw} за счет эпизодического отключения каналов связи. Если рассмотреть распределения нормированного количества различных метеоявлений (от $N_{(оя_6)}/N_{max_18}$ до $N_{(оя_12)}/N_{max_18}$ и от $N_{(оя_6)}/N_{max_22}$ до $N_{(оя_12)}/N_{max_22}$)

в десятикилометровых интервалах в зоне до 200 км (рис. 8), следует отметить, что по мере увеличения расстояния количество случаев вначале возрастает, а затем снижается.

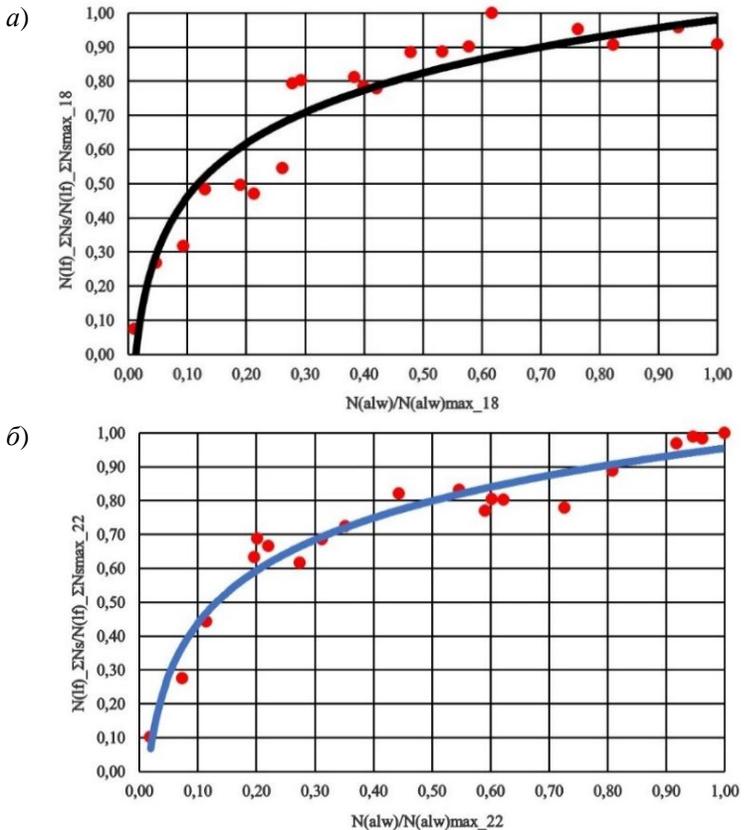


Рис. 7. Корреляционная зависимость между нормированными по максимуму значениями числа МР, зарегистрированных ГПС_{alw} (N_{alw}) и ГПС_{if} ($N_{(if)-\Sigma N_s}$) в радиусе 200 км за май–август 2018 (а) и 2022 (б) г.

Максимум случаев со слабыми конвективными осадками $N_{(оя_6)}$ наблюдается на удалениях 20–70 км, максимальное число случаев с вероятностью гроз 30 % $N_{(оя_9)}$ приходится на интервал 40–110 км

в 2018 г. и от 60 до 150 км в 2022 г. Максимум гроз $N_{(ор_11)}$ с вероятностью более 90 % и слабого града $N_{(ор_12)}$ приходится на расстояния R_{alwlf} 150–170 км в 2018 г. и 160–170 км в 2022 г. Количество метеоявлений, связанных с конвективными облаками, начинает снижаться с расстояний 70–120 км (рис. 8 а, б). В обоих случаях графики на рис. 8а и 8б практически повторяют друг друга. Коэффициент корреляции только в одном случае между $N_{(ор_9)}$ и $N_{(ор_22)}$ равен 0,65. В остальных случаях он более 0,91 (таблица 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции (r) между числом метеоявлений, полученных ДМРЛ в 2018 и 2022 гг.

Метеоявление, №	6	7	8	9	10	11	12
r	0,91	0,94	0,94	0,65	0,98	0,98	0,99

Во всех случаях увеличение с расстоянием числа МР $N_{(alw)}$ и $N_{(lf)}$ по данным ГПС (рис. 6) и $N_{(ор)}$ (рис. 8) по данным ДМРЛ в десятикилометровых интервалах можно объяснить увеличением площади с конвективными (грозовыми) облаками, а последующее снижение $N_{(ор)}$ (рис. 8) обусловлено уменьшением эффективности ДМРЛ. Известно, что при одном и том же потенциале радиолокатора эффективность обнаружения конвективных облаков тем выше, чем больше высота их верхней границы и отражаемость. Наличие осадков вблизи ДМРЛ значительно снижает эффективность обнаружения конвективных облаков. Облака, в которых наблюдаются грозы и град, могут быть обнаружены на больших расстояниях, чем облака со слабыми конвективными осадками (рис. 8).

При равномерном распределении числа разрядов $N_{(alw)}$ и $N_{(lf)}$, и количества метеоявлений $N_{(ор)}$ по территории (десятикилометровым интервалам) их зависимость от расстояния исключается при переходе к плотности МР и метеоявлений на единицу площади ($\rho_{(Nalw)}$, $\rho_{(Nlf)}$, и $\rho_{(Nor)}$). В реальных условиях равномерное распределение числа разрядов $N_{(alw)}$, $N_{(lf)}$ и метеоявлений $N_{(ор)}$ по окружности может получиться при продолжительных измерениях.

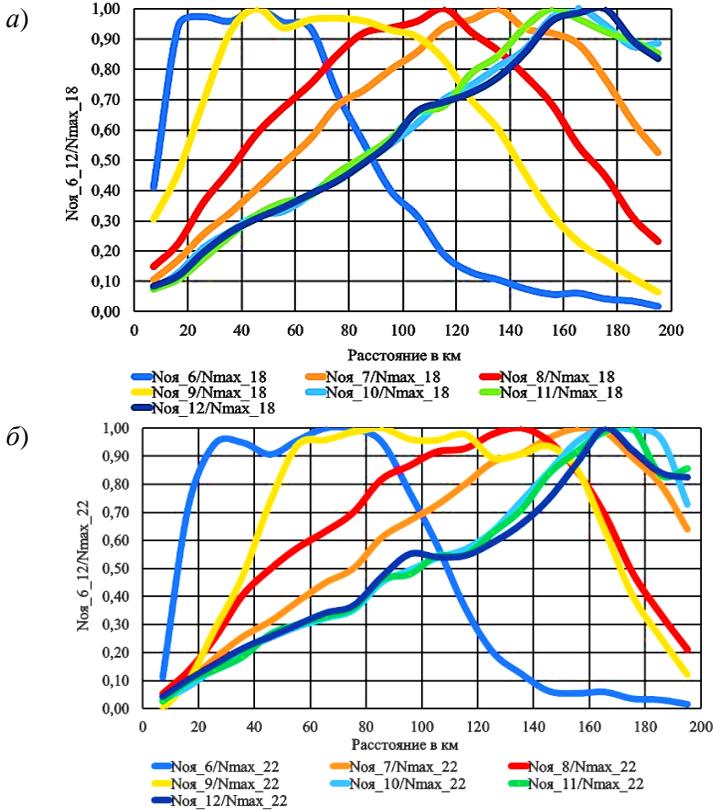


Рис. 8. Изменение нормированного числа метеоявлений

$N_{(o6_12)}/N_{(o6_12)max}$, наблюдаемых ДМРЛ, в десятикилометровых интервалах на удалении до 200 км в мае–августе 2018 (а) и 2022 г. (б)

На рисунке 9 показана зависимость плотности молниевых разрядов на 1 км^2 $\rho_{(Nalw)_18}$, $\rho_{(Nlf)_18}$ (рис. 9а) и $\rho_{(Nalw)_22}$, $\rho_{(Nlf)_22}$ (рис. 9б) от расстояния (по десятикилометровым интервалам). Кривые $\rho_{(Nalw)_18}$, $\rho_{(Nlf)_18}$ и $\rho_{(Nalw)_22}$, $\rho_{(Nlf)_22}$ заметно различаются. В 2018 г. плотность разрядов $\rho_{(Nalw)_18}$ по данным ГПС_{alw} на удалениях от 10 до 160 км изменяется в пределах от 5 до 7 МР на км^2 и увеличивается до 8 МР на км^2 на удалениях более 160 км. Плотность МР $\rho_{(Nlf)_18}$ по данным ГПС_{lf} максимальна на удалении 15 км (10,2 МР на км^2). На расстоянии 55 км

$\rho_{(Nif)_{18}}$ уменьшается в 3,2 раза, а на 200 км — в 6,2 раза (рис. 9а). В 2022 г. плотность МР $\rho_{(Nalw)_{22}}$ изменяется от 5,4 до 3,2 МР на км² на дистанции от 5 до 195 км, плотность МР $\rho_{(Nif)_{22}}$ на этих удалениях изменяется от 27,4 до 2,6 МР на км². Снижение $\rho_{(Nif)_{18}}$ и $\rho_{(Nif)_{22}}$ соответственно в 6,2 и 10,5 раза указывает на снижение эффективности обнаружения МР ГПС_{lf} по мере увеличения расстояния в зоне до 200 км.

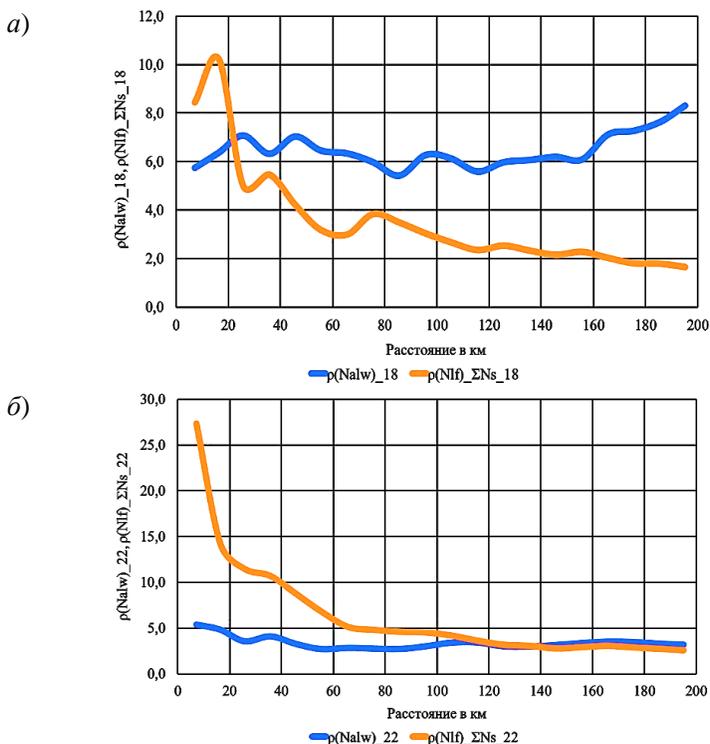


Рис. 9. Зависимость плотности молниевых разрядов на 1 км², вычисленной по данным ГПС_{lf} и ГПС_{alw} за 2018 (а) и 2022 гг. (б) от расстояния в десятикилометровых интервалах

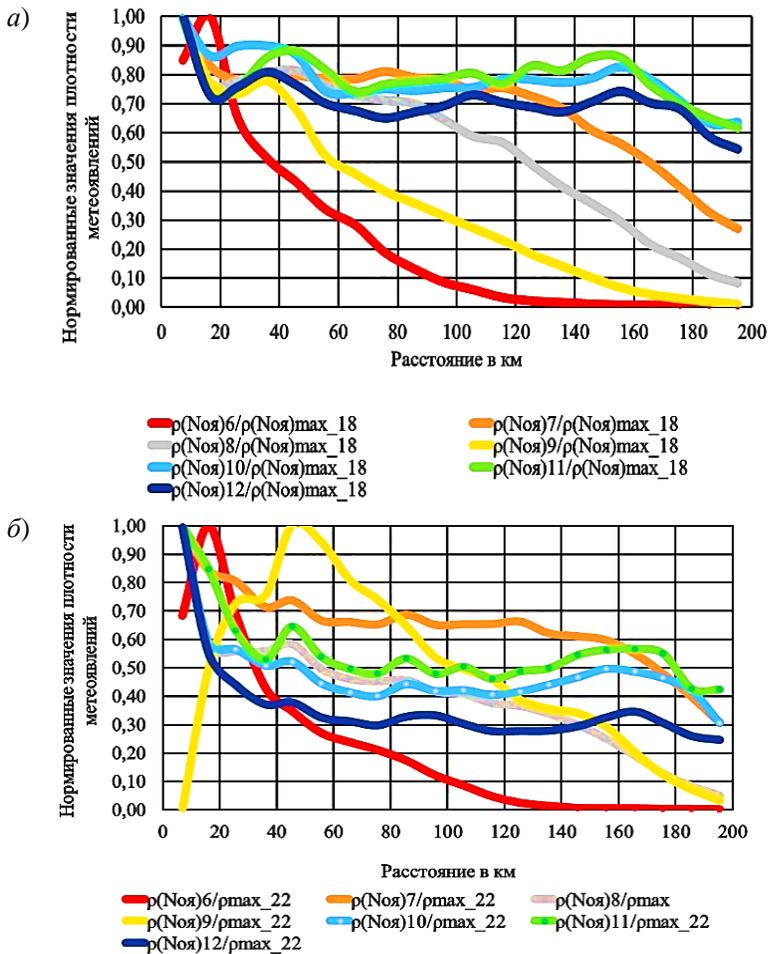


Рис. 10. Зависимость нормированных значений плотности метеоявлений на один квадратный километр, вычисленных по данным ДМРЛ за 2018 (а) и 2022 гг. (б) от расстояния в десятикилометровых интервалах

Анализ нормированных значений плотности метеоявлений на один км^2 за 2018 $\rho(\text{Ноя})/\rho(\text{Ноя})\text{max_18}$ и 2022 гг. $\rho(\text{Ноя})/\rho(\text{Ноя})\text{max_22}$ годы (рис. 10 а, б) показал, что по мере увеличения расстояния плотность метеоявлений, связанных с конвективными облаками $\rho(\text{Ноя})6/\rho(\text{Ноя})\text{max}$, $\rho(\text{Ноя})7/\rho(\text{Ноя})\text{max}$

и $\rho_{(Ноя)8}/\rho_{(Ноя)max}$ снижается значительно быстрее, чем с метеоявлениями связанных с грозами $\rho_{(Ноя)9}/\rho_{(Ноя)max}$, $\rho_{(Ноя)10}/\rho_{(Ноя)max}$, $\rho_{(Ноя)11}/\rho_{(Ноя)max}$ и слабым градом $\rho_{(Ноя)12}/\rho_{(Ноя)max}$. Таким образом, подтверждается сделанный выше вывод о том, что эффективность обнаружения конвективных, грозовых и градовых облаков зависит от расстояния до ДМРЛ.

Коэффициенты корреляции между значениями плотности метеоявлений на 1 км^2 , полученными в 2018 и 2022 гг., приведены в таблице 5. Умеренная (0,48) и заметная (0,54) корреляционная связь соответствует значениям плотности $\rho_{(Ноя)9_{18}}$, $\rho_{(Ноя)9_{22}}$ и $\rho_{(Ноя)11_{18}}$, $\rho_{(Ноя)11_{22}}$. В остальных случаях коэффициент корреляции изменяется от 0,81 до 0,99.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции (r) между значениями плотности ($\rho_{Ноя}$) метеоявлений на 1 км^2 , полученными в 2018 и 2022 гг.

Метеоявление, №	6	7	8	9	10	11	12
r	0,99	0,93	0,94	0,48	0,81	0,54	0,85

В таблице 6 приводятся коэффициенты корреляции $r_{(Nalwоя)}$ и $r_{(Nlfоя)}$ между плотностью МР по данным ГПС_{alw} ($\rho_{(N(alw))}$), по данным ГПС_{lf} ($\rho_{(N(lf))}$) и плотностью метеоявлений $\rho_{(Ноя)}$ за 2018 и 2022 гг. по десятикилометровым интервалам в зоне 200 км от ДМРЛ.

В 2018 г. плотность числа разрядов $\rho_{(N(alw)_{18})}$ по данным ГПС_{alw} коррелировала с плотностью метеоявлений $\rho_{(Ноя)}$ от слабых конвективных осадков до слабого града с отрицательным знаком. Слабая связь наблюдалась со слабыми конвективными осадками $\rho_{(Ноя)6}$ и грозой с вероятностью 30–70 % $\rho_{(Ноя)9}$. В остальных случаях наблюдалась умеренная (0,42–0,45), заметная (0,56–0,63) и высокая (0,74) связь с плотностью умеренных конвективных осадков $\rho_{(Ноя)7}$ (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты корреляции $\Gamma(\rho_{N(alw_{01})})$ и $\Gamma(\rho_{N(lf_{01})})$ между плотностью МР $\rho_{(N(alw))}$, $\rho_{(N(lf))}$ по данным ГПС_{alw}, ГПС_{lf} и плотностью метеоявлений $\rho_{(N(o1))}$ по десятикилометровым интервалам за май–август 2018 и 2022 гг. в радиусе 200 км от ДМРЛ

Метеоявление, №	$\rho_{(N(alw)_{18})}$	$\rho_{(N(lf)_{\Sigma Ns_{18}})}$	$\rho_{(N(alw)_{22})}$	$\rho_{(N(lf)_{\Sigma Ns_{22}})}$
	2018		2022	
6	-0,12	0,95	0,68	0,82
7	-0,74	0,64	0,55	0,81
8	-0,56	0,71	0,54	0,87
9	-0,29	0,86	-0,36	0,00
10	-0,42	0,73	0,82	0,93
11	-0,63	0,36	0,84	0,90
12	-0,45	0,64	0,84	0,96

Регрессионный анализ моделей зависимых переменных $\rho_{(N(alw)_{18})}$, $\rho_{(N(lf)_{18})}$, $\rho_{(N(alw)_{22})}$ и $\rho_{(N(lf)_{22})}$ с независимыми $\rho_{(N_{01} \text{ } 6_{12})}$ по десятикилометровым интервалам в зоне до 200 км показал, что коэффициенты детерминации R^2 (табл. 7) значительно выше (от 0,71 до 0,98), чем коэффициенты для моделей распределения МР и метеоявлений по десятиградусным секторам (от 0,21 до 0,53). Низкие значения погрешности аппроксимации A зависимости плотности МР от плотности числа метеоявлений (от 7,3 до 12,3 %), определяют высокое качество рассмотренных моделей, а коэффициенты детерминации отражают высокую связь интенсивности грозовой активности и различных метеоявлений в десятикилометровых интервалах на удаленностях до 200 км.

Критерии Дарбина—Уотсона (DW) указывают на отсутствие автокорреляции в исследуемых моделях (табл. 7).

Расчеты дельта-коэффициентов при анализе связи числа МР по данным ГПС_{alw} $N_{(alw)}$ и ДМРЛ $N_{(o1)}$ по десятикилометровым интервалам показали, что за 2018 и 2022 гг. в 35,8 % случаев $N_{(alw)}$ были зарегистрированы ГПС_{alw} в ячейках, определяемых ДМРЛ, как конвективные осадки (число метеоявлений $N_{(o1 \text{ } 6_{8})}$) и в 64,2 % случаев

в ячейках, определяемых как грозы с различной вероятностью и слабый град (число метеоявлений $N_{(оя_9_12)}$).

В 61,8 % случаев за 2018 и 2022 гг. ГПС_{If} регистрировала МР в ячейках с метеоявлениями, определяемых ДМРЛ, как конвективные осадки и в 38,2% случаев, как грозы с различной вероятностью или слабый град.

Таким образом, полученные результаты обработки данных ГПС и ДМРЛ указывают на регистрацию ГПС молниевых разрядов не только в облаках классифицируемых как грозовые с различной вероятностью и слабым градом (число метеоявлений $N_{(оя_9_12)}$), но и в облаках с конвективными осадками разной интенсивности $N_{(оя_6_8)}$.

Таблица 7

Параметры моделей зависимости плотности МР, зарегистрированных ГПС_{alw} $\rho(Nalw)$ и ГПС_{If} $\rho(NIf)$, от плотности метеоявлений $\rho(N_{(оя_6_12)})$ по данным ДМРЛ за 2018 и 2022 гг. в десятикилометровых интервалах в зоне до 200 км

Модель	R ²	DW	A %
$\rho(Nalw)_{\rho(N_{(оя_6_12)}_{18})}$	0,83	1,5	7,8
$\rho(NIf)_{\rho(N_{(оя_6_12)}_{18})}$	0,95	1,8	12,3
$\rho(Nalw)_{\rho(N_{(оя_6_12)}_{22})}$	0,71	1,9	7,3
$\rho(NIf)_{\rho(N_{(оя_6_12)}_{22})}$	0,98	1,3	8,5

Заключение

Многофакторные модели связи между плотностью числа МР по данным грозопеленгационных систем ГПС_{alw}, ГПС_{If} и плотностью метеоявлений по данным ДМРЛ в зависимости от расстояния оказались более эффективными, чем от направления (азимута). Коэффициенты детерминации R² изменяются от 0,71 до 0,98 и подтверждают наличие связей различных метеоявлений и интенсивности гроз на удалениях до 200 км.

Низкие значения погрешности аппроксимации (от 7,3 до 12,3 %) зависимости плотности МР от плотности числа метеоявлений, характеризуют высокое качество рассмотренных моделей.

Расчеты дельта-коэффициентов при анализе связи числа МР по данным ГПС_{alw} и ДМРЛ по десятикилометровым интервалам показали, что в 35,8 % случаев молниевых разрядов зарегистрировано ГПС_{alw} в ячейках, определяемых ДМРЛ, как конвективные осадки и в 64,2 % случаев в ячейках, определяемых как грозы с различной вероятностью и слабый град. В тоже время ГПС_{lf} зарегистрировала 61,8 % молниевых разрядов в ячейках с метеоявлениями, определяемых ДМРЛ, как конвективные осадки и в 38,2 % МР, как грозы с различной вероятностью или слабый град.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2021). К экспериментальной оценке токов молний. Труды ГГО. 2021. Вып. 603. С. 79–129.

Chaddock RE. (1925). Principles and methods of statistics. – Boston, New York, [etc.]. 471 p.

ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ: ТЕКУЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В XXI В.

А. Н. Махоткин¹, Е. Л. Махоткина¹, И. Н. Плахина²

¹Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

²Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН
119017 Москва, Пыжевский пер, д. 3

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences
Moscow, Pyzhyovskiy pereulok, 3

Поступила в редакцию 23.06.2023
Поступила после доработки 3.09.2023

Введение

Первые десятилетия XXI в. относятся к продолжающемуся с конца XX в. периоду, который в глобальном масштабе характеризуется увеличением приходящей солнечной радиации и ростом прозрачности атмосферы. Такое состояние атмосферы в значительной степени обусловлено тем, что с конца XX в. на земном шаре не происходили мощные вулканические извержения, приводящие к значительным и долговременным изменениям ее прозрачности. Последствия последнего мощного извержения вулкана Пинатубо (Филиппины, июнь 1991 г.) резко изменили естественный ход прозрачности атмосферы на всем земном шаре в течение 1992–1993 гг. и проявлялись в ряде регионов на протяжении 22 месяцев. К 1994 г. произошло очищение атмосферы от вулканического аэрозоля.

В ряде зарубежных работ начавшийся период получил название «brightening» — период аэрозольного «просветления» атмосферы (Wild, 2012).

В XXI в. изменениям солнечной радиации (и прозрачности атмосферы) в глобальном и региональном масштабах уделяется достаточное внимание. Обобщенные данные о прозрачности атмосферы на территории России представлены в Оценочных докладах об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации (ОД, 2008; ОД, 2014; ОД-3, 2022). На регулярной основе результаты мониторинга оптической плотности и прозрачности атмосферы по данным 10 станций публикуются в Обзоре фоновое состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ (<http://www.igce.ru/category/informacionnye-produkty-obzory-doklady-i-dr>).

В настоящее время мониторинг прозрачности атмосферы может осуществляться по данным различных наблюдательных систем: наземной актинометрической сети Росгидромета (77 станций, выполняющих наблюдения в 6 стандартных сроков — на 1.01.2023), международной сети AERONET (Aerosol Robotic Network – 9 пунктов на территории России), системы спутникового мониторинга, реализованной на ИСЗ Terra и Aqua.

Настоящая работа является продолжением начатых в 2005 г. исследований характеристик прозрачности по данным актинометрических наблюдений, выполняемых на климатической наблюдательной сети Росгидромета (Махоткина и др., 2005). Поскольку выполненные ранее обобщения были ограничены периодом 1976–2014 гг. (Махоткина, Плахина, 2014; Махоткина и др., 2015), представляется логичным вновь обратиться к анализу накопленной в последние годы информации.

Цель настоящего исследования — получение количественных оценок изменения мутности атмосферы на территории России в целом и в отдельных ее регионах за период 2000–2022 гг.

Используемые данные

Объектом настоящего исследования являются ряды месячных и годовых значений фактора мутности T_2 и аэрозольной оптической толщины атмосферы АОТ, сформированных для отдельных станций за период (1957÷1960)–2022 гг., а для регионов России за период 1976–2022 гг.

На ЕТР были рассмотрены три региона: север, центр, юг, на АТР — шесть: Урал, Западная Сибирь, Средняя Сибирь (центр АТР), северо-восток АТР, Прибайкалье и Забайкалье (юг АТР), Дальний Восток. Методики расчета характеристик интегральной мутности и АОТ, приведены в работах (Махоткина и др., 2005; Плахина и др., 2007; Тарасова, Ярхо, 1991).

Изменения месячных и годовых значений T_2 и АОТ по регионам анализировались за периоды 1976–1991, 1994–2022 и 2000–2022 гг.

Ряды месячных и годовых значений T_2 и АОТ описывались линейными уравнениями

$$T_2 = at_i + b, \quad \text{АОТ} = at_i + b \quad (1),$$

где T_2 — фактор мутности при массе атмосферы $m = 2$, АОТ — аэрозольная оптическая толщина атмосферы, рассчитанная по методике (Тарасова, Ярхо, 1991), t — время (порядковый номер года от начала рассматриваемого временного ряда, т. е. с 1976 или 2020 г.). Скорость изменения T_2 и АОТ оценивалась по коэффициенту «а» в уравнении регрессии (1) за 10 лет ($a \times 10$).

Средние многолетние значения T_2 ср. и АОТ ср. для установленных ВМО периодов (1961–1990 — историческая норма, 1981–2010 и 1991–2020 гг. — текущие нормы) были рассчитаны только для выборочных станций.

Изменения прозрачности атмосферы для регионов оценивались с учетом длины имеющихся рядов путем сравнения средних за 1981–2010 и 1991–2020 гг.

Отклонения (Δ) текущих данных от норм за различные периоды рассчитывались по формуле:

$$\Delta = (Y_{\text{тек.}} - Y_{\text{норм.}}) / Y_{\text{норм.}} \cdot 100 \%$$

Особенности изменения прозрачности на территории России с середины XX в.

Анализ временного хода T_2 и АОТ со второй половины XX в. по настоящее время, выполненный для отдельных станций, расположенных в различных регионах Российской Федерации, показал, что в последние 60 лет можно выделить три периода: в 1960–1981 гг. наблюдалось устойчивое снижение прозрачности атмосферы и соответственно увеличение ее мутности, в 1983–1992 гг. (период между мощными вулканическими извержениями) мутность атмосферы восстановилась до уровня, близкому к предыдущему периоду, с 1994 г. произошло заметное снижение мутности (рис. 1) и эта тенденция сохраняется по настоящее время.

Глобальные эффекты крупных извержений (Эль-Чичон, апрель 1982 г., Мексика; Пинатубо, июнь 1991 г., Филиппины) проявились на всей территории России в резком увеличении мутности спустя 3–6 месяцев после извержений и постепенном уменьшении ее до обычных значений спустя полтора – два года.

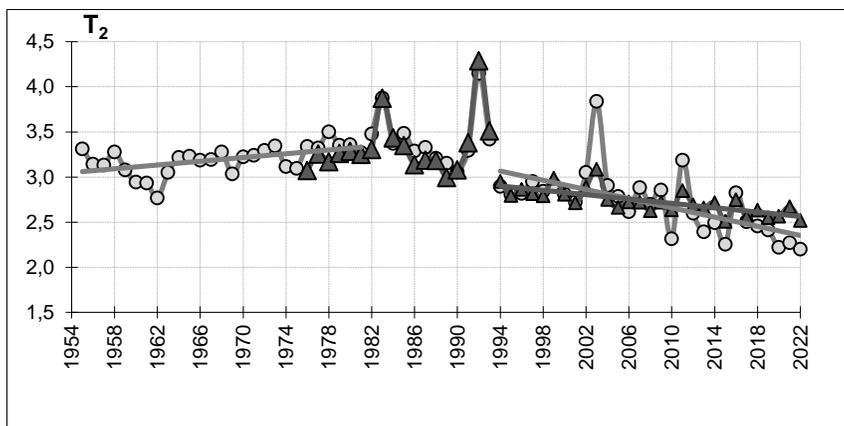


Рис. 1. Временной ход T_2 в центральной части ЕТР (треугольники) и станции Каменная Степь (кружки)

Средние многолетние значения T_2 и АОТ для установленных ВМО трех базовых периодов рассчитаны для отдельных станций (табл. 1).

Таблица 1

Средние многолетние годовые значения T_2 и АОТ для различных базовых периодов ВМО

Станция	T_2			АОТ		
	среднее	Δ_1	Δ_2	среднее	Δ_1	Δ_2
	1961–1990	1981–2010	1991–2020	1961–1990	1981–2010	1991–2020
Бугрино	2,73±0,23	1	–1	0,14±0,03	0	–14
Коткино	2,58±0,22	0	–7	0,12±0,03	–8	–25
Елецкая	2,65±0,32	–2	–6	0,14±0,05	–7	–29
Валдай	2,90±0,25	–4	–9	0,15±0,05	–13	–33
Каменная Степь	3,25±0,20	–5	–11	0,20±0,03	–10	–25
Цимлянск	3,30±0,35	–4	–13	0,20±0,06	–10	–30
Верхнее Дуброво	2,76±0,26	–1	–4	0,14±0,04	–7	–14
Хабаровск	2,91±0,26	–2	–9	0,17±0,03	0	–24

Примечание: $\Delta_1 = (Y_{1981-2010} - Y_{1961-1990}) / Y_{1961-1990} \cdot 100 \%$.

$\Delta_2 = (Y_{1991-2020} - Y_{1961-1990}) / Y_{1961-1990} \cdot 100 \%$.

Средние T_2 за 1981–2010 гг. на большинстве станций ниже норм базового периода 1961–1990 гг. на 1–5 %, а за период 1991–2020 — на 4–13 %, исключение составляет самая северная из представленных станций — Бугрино, на которой средние близки для всех периодов. Различия в АОТ заметно выше: для периода 1981–2010 гг. они колеблются от –7 до –13 %, а для периода 1991–2020 — от –14 до –33 %

Для подавляющего большинства актинометрических станций и всех регионов России нормы T_2 и АОТ определены только для двух периодов, предложенных ВМО: 1981–2010 и 1991–2020 гг. Нормы T_2

и АОТ за указанные периоды на территории России различаются в среднем на 4 % для T_2 и на 17 % для АОТ. В центральных и южных областях ЕТР, а также на Урале и Дальнем Востоке изменения средних T_2 достигают 6 %, а на севере ЕТР и АТР и в Забайкалье они составляют 3 %. Различия в нормах АОТ колеблются от 20 % на севере ЕТР и АТР до 14 % на Урале и в отдельных регионах Сибири.

При выборе базового периода для определения аномалий T_2 и АОТ необходимо учитывать, что различия в средних многолетних значениях могут заметно сказаться на их уровне. При этом в работах по анализу временных изменений мутности исследователи обычно выбирают базовый период с учетом продолжительности имеющихся рядов: 1961–1990, 1979–2012, 1976–2005 гг. С методической точки зрения оптимальным базовым периодом является 1961–1990 гг., относительно которого ведется мониторинг радиационных факторов климата. Переход к базовому периоду 1991–2020 гг. заметно скажется на величине аномалий и приведет к их увеличению в период до 1991 г.

Ранее проведенные исследования показали, что в период 1976–2014 гг. временной ход T_2 и АОТ во всех регионах России идентичен: T_2 и АОТ увеличиваются с северо-востока на юго-запад (Махоткина, Плахина, 2014; Махоткина и др., 2015). Анализ рядов годовых значений T_2 и АОТ за период 1976–2022 гг. подтвердил ранее установленные для территории России закономерности их пространственного распределения (рис. 2). На рисунке 2 представлен временной ход годовых значений T_2 и АОТ для трех регионов: северо-восток АТР, Западная Сибирь и юг ЕТР. Такой выбор регионов дает представление о наблюдаемых изменениях мутности в регионах с различной аэрозольной нагрузкой. На ЕТР мутность увеличивается с севера на юг, на азиатской территории эта тенденция не проявляется (табл. 2). Интегральная мутность в период «просветления» атмосферы снизилась по сравнению с периодом 1976–1991 гг. от 6 на северо-востоке АТР до 15–16 % в центральных и южных областях ЕТР и Урале (табл. 2). Ранее при сравнении средних за периоды 1976–1991 и 1994–2014 гг. расхождения между ними составляли 4–14 % (Махоткина и др., 2015).

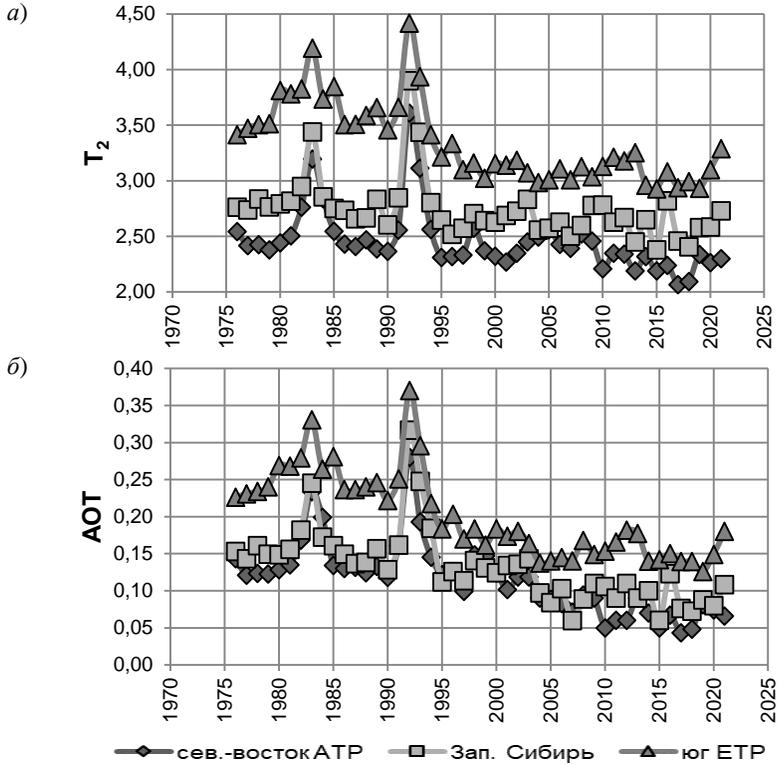


Рис. 2. Изменение T_2 (а) и АОТ (б) в 1976–2022 гг. на северо-востоке АТР, в Западной Сибири и юге ЕТР

Таблица 2

Средние годовые значения T_2 в периоды с различной аэрозольной нагрузкой

Регион		T_2 ср. $\pm \delta$	C_v	T_2 ср. $\pm \delta$	C_v	Δ %
		1976-1991		1994-2022		
ЕТР	север	2,76 \pm 0,13	0,05	2,57 \pm 0,13	0,06	-7
	центр	3,26 \pm 0,20	0,06	2,73 \pm 0,14	0,05	-16
	юг	3,66 \pm 0,13	0,04	3,12 \pm 0,13	0,04	-15
Урал		3,05 \pm 0,18	0,09	2,62 \pm 0,12	0,05	-15

Продолжение таблицы 2

Регион		T ₂ ср. ±δ	Cv	T ₂ ср. ±δ	Cv	Δ %
		1976-1991		1994-2022		
АТР	северо-восток	2,55±0,21	0,08	2,39±0,14	0,06	-6
	Западная Сибирь	2,85±0,21	0,07	2,65±0,14	0,05	-7
	Средняя Сибирь	2,77±0,21	0,07	2,59±0,18	0,07	-7
	Прибайкалье и Забайкалье	2,82±0,20	0,07	2,56±0,10	0,04	-9
	Дальний Восток	2,93±0,18	0,07	2,64±0,16	0,06	-10

Примечание: Cv — коэффициент вариации,

$$\Delta = (Y_{1994-2022} - Y_{1976-1991}) / Y_{1976-1991} \cdot 100 \%$$

Годовой ход T₂ и АОТ в последней четверти XX в. до наступления периода «просветления атмосферы» оставался стабильным (Махоткина и др., 2015), что подтверждают данные для периодов 1976–1981, 1984–1991 гг. (рис. 4).

Особенности изменения прозрачности на территории России в XXI в.

Рассматривая текущие изменения климатообразующих параметров атмосферы, исследователи все чаще обращаются к данным за период с 2000 г. по настоящее время (КЛИМАТ-2023, 2023). Анализ рядов месячных и годовых значений T₂ и АОТ показал, что в XXI в. для территории России на фоне ранее установленных закономерностей изменения мутности атмосферы (Махоткина и др., 2015) усилилось проявление региональных особенностей.

Для периода 2000–2022 гг. изменения T₂ и АОТ оценивались по уравнениям линейной регрессии. (табл. 3). В целом на территории России сохранилась сложная картина временных и пространственных изменений мутности атмосферы.

Статистические характеристики T_2 и АОТ за период 2000–2022 гг.

Регион	T_2			АОТ					
	среднее	δ	c_v	среднее	δ	c_v			
	a					a			
ЕТР	север	2,55	0,12	0,05	-0,036	0,09	0,02	0,21	-0,01
	центр	2,70	0,13	0,11	-0,126	0,10	0,01	0,15	-0,00
	юг	3,09	0,11	0,04	0,00	0,16	0,02	0,11	-0,01
Урал	северо-восток	2,55	0,10	0,04	-0,041	0,09	0,01	0,15	-0,02
	Западная Сибирь	2,32	0,13	0,05	-0,098	0,08	0,02	0,29	-0,02
	Средняя Сибирь	2,63	0,13	0,05	-0,033	0,10	0,02	0,24	-0,02
АТР	Забайкалье и Прибайкалье	2,63	0,17	0,07	0,187	0,11	0,02	0,23	0,02
	Дальний Восток	2,58	0,10	0,04	0,006	0,11	0,02	0,17	-0,01
		2,55	0,13	0,05	-0,121	0,11	0,02	0,20	-0,02

Примечание: a – коэффициент линейного тренда (умноженный на 10).

Средние годовые значения T_2 уменьшаются за исключением юга ЕТР, где они практически постоянны, и Средней Сибири, где проявляется тенденция к их увеличению, отмеченная ранее в работе (Махоткина и др., 2015). Годовые значения АОТ во всех регионах снижаются, скорость изменения АОТ за 10 лет составляет $-0,02 \dots -0,01$, кроме Средней Сибири, где АОТ увеличивается.

Изменения годовых значений T_2 и АОТ России иллюстрирует рисунок 3, в соответствии с которым на севере ЕТР T_2 и АОТ сохраняют тенденцию к снижению, на территории Средней Сибири интегральная и аэрозольная мутность увеличивается, на юге ЕТР в условиях стабильной интегральной мутности аэрозольное загрязнение слабо снижается.

В 2000–2022 гг. годовой ход T_2 и АОТ заметно изменился по сравнению с более ранними периодами. Во всех регионах произошло уменьшение средних месячных значений наиболее значительное в первой половине года (рис. 4). Для АОТ снижение средних месячных значений в первую половину года привело к уменьшению, а в отдельных случаях исчезновению весеннего (апрельского) максимума, который проявлялся на северо-востоке АТР, в центре ЕТР, западной Сибири на временном интервале 1976–1991 гг. (Махоткина и др., 2015). В регионах с четко выраженным годовым ходом максимум АОТ наблюдается в июне–июле или июле–августе.

В XXI в на фоне высокой прозрачности атмосферы возникают кратковременные повышения (в отдельных случаях до максимумов) АОТ и T_2 во время участившихся катастрофических лесных пожаров 2002, 2003, 2006, 2007, 2010, 2016, 2018 годов, проявляющиеся как локально, так и на обширных площадях (Плахина и др., 2011; Сакерин и др., 2014; Ситнов и др., 2017; Томшин., Соловьев, 2016; Чубарова и др., 2011).

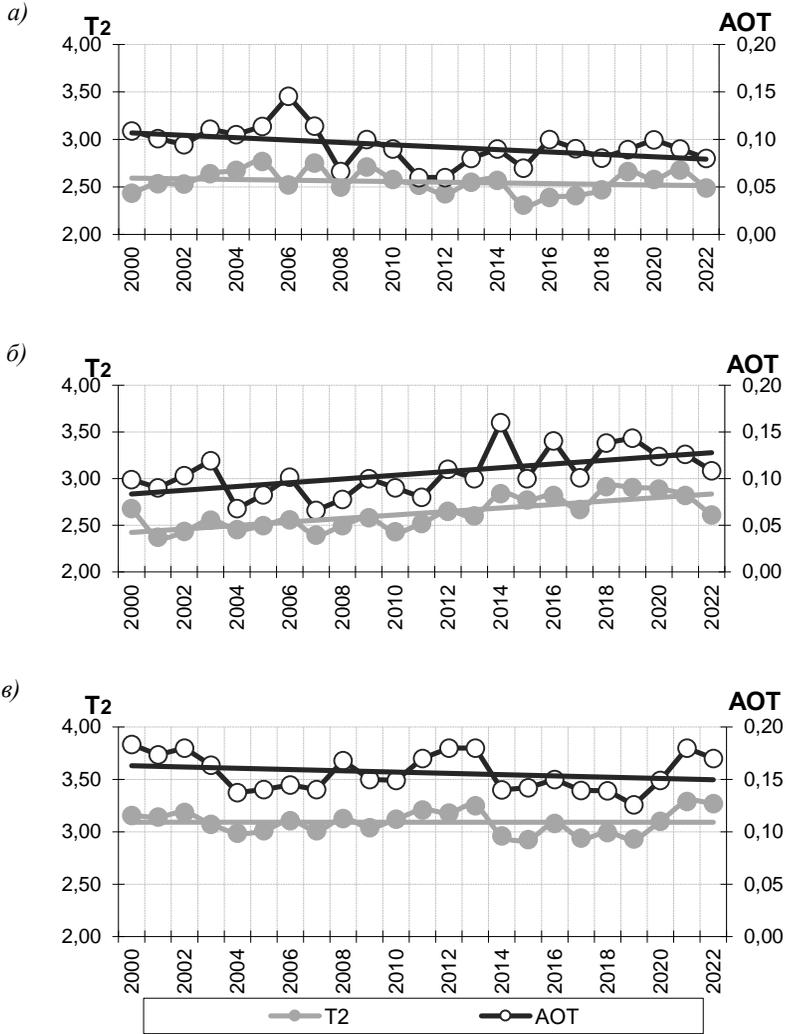


Рис. 3. Изменение T_2 и AOT с 2000 по 2022 гг. на севере ЕТР (а), в Средней Сибири(б) и юге ЕТР (в)

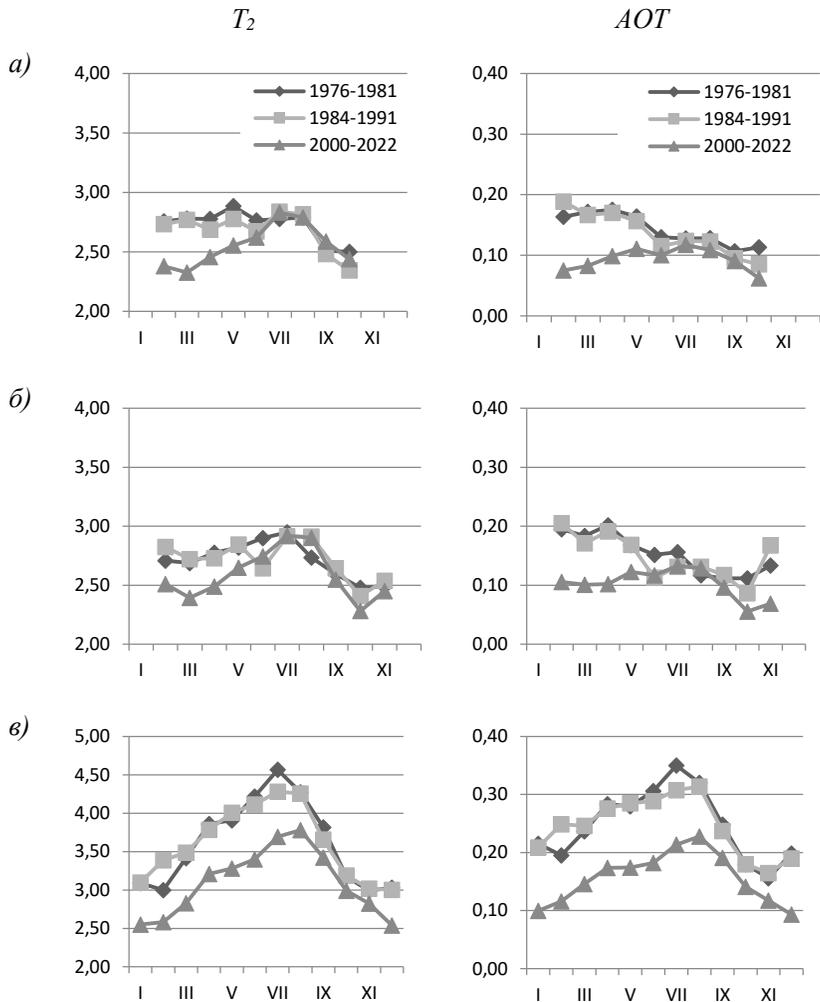


Рис. 4. Годовой ход T_2 и АОТ с 2000 по 2022 гг. на севере ЕТР (а), в Средней Сибири(б) и юге ЕТР (в)

В литературе подробно анализировались особенности аномального лета 2010 г. на ЕТР. Тогда на фоне аномальной жары пожары затронули всю территорию европейской части страны, в результате чего в атмосфере образовалась замкнутая область экстремально высокой задымленности (48° – 55° с. ш.; 37 – 42° в. д.). Изменения аэрозольной мутности летом 2010 г. рассмотрены в работе Н. Е. Чубаровой с соавторами (2010) по данным Метеорологической обсерватории МГУ, а в работе С. А. Ситнова (2011) — для центральных районов ЕТР по данным спутниковых систем. Результаты, полученные в указанных работах, могут быть дополнены данными наблюдений, выполняемых на наземной актинометрической сети. Для этого были проанализированы результаты актинометрических наблюдений на отдельных станциях региона. Для станций Каменная Степь, Ершов, Нижнедевицк, Ершов, Нолинск, Валдай, Чермоз, Санкт-Петербург, Воейково, Каргополь, Усть-Вымь, Ираель, Архангельск (перечислены в порядке возрастания широты) были рассчитаны дневные и средние месячные значения T_2 и АОТ за период с июня по сентябрь 2010 г. В сложившихся на территории ЕТР летом 2010 г. погодных условиях мутность атмосферы определялась преимущественно аэрозольной составляющей. Вариации дневных значений T_2 и АОТ на каждой конкретной станции были идентичны. В качестве примера на рис. 5 представлен ход средних дневных величин T_2 и АОТ для станции Нижнедевицк, Усть-Вымь, Вязовые, на которых мутность атмосферы менялась в широких пределах. Если в июне и первой половине июля колебания T_2 и АОТ носили обычный характер, то в последней декаде июля — первой половине августа они резко увеличились. Экстремальные значения мутности отмечены в период с 26 июля по 8 августа (наиболее значительное помутнение атмосферы наблюдалось 29 и 30 июля, когда значения T_2 достигали 7 и более). Очищение атмосферы произошло во второй декаде августа.

Проявление воздействия дымового аэрозоля на станциях Санкт-Петербург и Воейково представлено в таблице 4. Станции находятся на расстоянии 12 км и выявляют особенности состояния атмосферы большого города и ближайшего пригорода.

Несмотря на резкие повышения мутности в отдельные дни лета 2010 г., средние месячные значения T_2 и АОТ не на всех рассматриваемых станциях превысили средние многолетние значения.

Для детального анализа относительно непродолжительных периодов с дымной мглой данные наземной актинометрической сети должны использоваться совместно со спутниковой информацией.

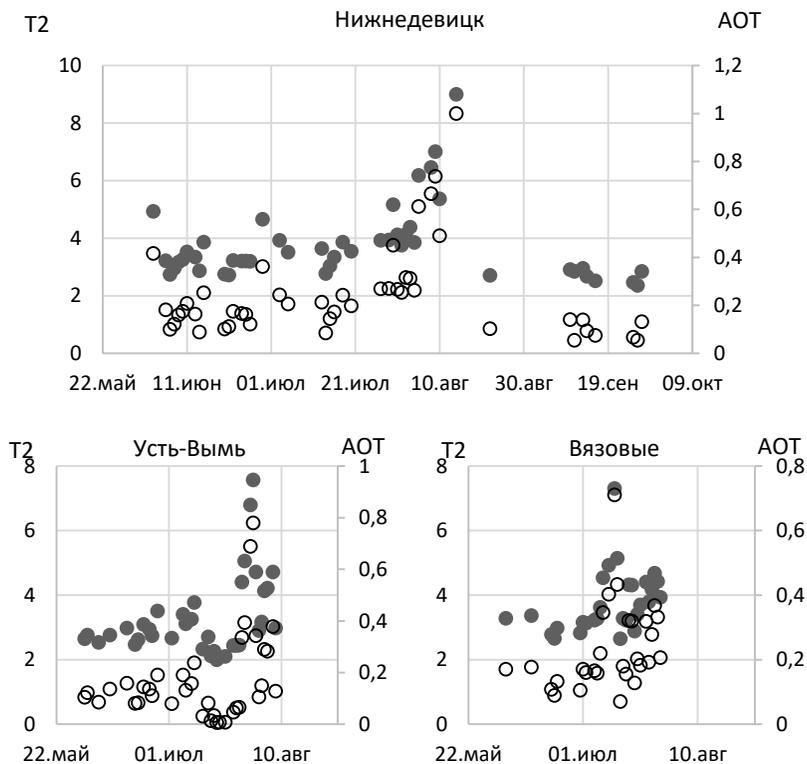


Рис. 5. Ход средних дневных величин T_2 (темные кружки) и АОТ (светлые кружки) на станциях Нижнедевицк, Усть-Вымь, Вязовые в июне – сентябре 2010 г.

Таблица 4

Средние значения T_2 и АОТ на станциях Санкт-Петербург и Воейково
в июне – августе 2010 г.

Период	T_2		АОТ	
	<i>СПб</i>	<i>Воейково</i>	<i>СПб</i>	<i>Воейково</i>
1.06–20.07 2010	3,22	2,89	0,13	0,10
21.07–15.08 2010	4,32	3,70	0,29	0,21
16.08–30.09 2010	2,64	2,69	0,09	0,09

Влияние лесных пожаров в другие годы, как правило, проявлялось в повышении дневных и месячных значений T_2 и АОТ по данным станций Сибирского региона и Дальнего Востока.

Заклучение

В XXI в. на большей части территории России сохраняются тенденция к уменьшению интегральной и аэрозольной мутности атмосферы. При этом на фоне межгодовых изменений месячных и годовых значений T_2 и АОТ усилилось проявление региональных особенностей, выразившееся в стабилизации и даже некотором увеличении мутности атмосферы в южных районах ЕТР и Средней Сибири.

Поскольку рассмотренные временные ряды T_2 и АОТ малы по сравнению с масштабами климатических изменений, полученные результаты соответствуют только рассматриваемому периоду наблюдений и не могут служить основой для прогноза предстоящих изменений.

Представленные в работе результаты докладывались на Третьей Международной конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023». 9–13 октября 2023 года. — Москва. ИФА РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

КЛИМАТ-2023 (2023) Международная конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023». 9–13 октября 2023 года. Сборник тезисов докладов. — М.: Физмат-книга. 246 с.

Махоткина Е. Л., Плахина И. Н., Лукин А. Б. (2005). Некоторые особенности изменения мутности на территории России в последней четверти XX века // *Метеорология и гидрология*. № 1. С. 28–36.

Махоткина Е. Л., Плахина И. Н. (2014). Мониторинг прозрачности атмосферы: результаты измерений за последние десятилетия // *Труды ГГО*. Вып. 572. С. 57–88.

Махоткина Е. Л., Плахина И. Н., Махоткин А. Н. (2015) Прозрачность атмосферы на территории России: изменения за последние 40 лет // *Труды ГГО*. Вып. 579. С. 162–177.

ОД-1 (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1,2 / под ред. А.И. Бедрицкого [и др.]. — М.: Росгидромет. 230 и 291 с.

ОД-2 (2014). Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова, С. М. Семенова. — М.: Росгидромет. 1009 с.

ОД-3 (2022). Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. — СПб: Научное издание. 676 с.

Плахина И. Н., Махоткина Е. Л., Панкратова Н. В. (2007). Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России в 1976–2003 гг. // *Метеорология и гидрология*. № 2. С. 19–29.

Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л. (2011). Пространственные вариации фактора мутности атмосферы над европейской территорией России в условиях аномального лета 2010 г. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 47. № 6. С. 1–6.

Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Кабанов Д. М., Николашкин С. В., Прахов А. Н., Радионов В. Ф., Турчинович Ю. С., Чернов Д. Г., Holben B. N., Smirnov A., Sorokin M. G. (2014). О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в арктических районах // *Оптика атмосферы и океана*. Т 27. № 5. С. 414— 423.

Ситнов С. А. (2011). Пространственно-временная изменчивость оптической толщи над центральной частью европейской территории России по данным спутниковых приборов MODIS // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т.47. № 5. С. 634—652.

Ситнов С. А., Мохов И. И., Горчаков Г. И., Джоло А. В. (2017). Дымная мгла над европейской территорией России летом 2016 года: связь с лесными пожарами в Сибири

и аномалиями атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. № 8. С. 50—64.

Тарасова Т.А., Ярхо Е.В. (1991). Определение аэрозольной оптической толщины атмосферы по измерениям прямой интегральной радиации // Метеорология и гидрология. № 12. С. 66—71.

Томишин О. А., Соловьев В. С. (2016). Исследование крупномасштабных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т.29. № 7. С. 598-602.

Чубарова Н. Е., Горбаренко Е. В., Незваль Е. И., Шиловцева О. А. (2011). Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмосковье. // Известия РАН. ФАО.Т. 47. № 6. С. 790—800.

Liev K. B., Kushchev S. A., Inuhin V. S. (2021). Movements of hail cells on the territory of the Kabardino-Balkarian Republic in 2017 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 840 (1), 012027.

Wild M. (2012). Enlightening global dimming and brightening // American Meteorological Society // № 1. P. 27—37. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-0074.1

УДК 551.509.617

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ КЛАСТЕРОВ ИЗ НАНОТРУБОК ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

М. Ч. Залиханов, Б. М. Хучунаев, С. О. Геккиева, А. Х. Будаев

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail buzgigit@mail.ru, sgekkieva@list.ru,
budayalim@yandex.ru

Поступила в редакцию 1.09.2023

Поступила после доработки 28.09.2023

Введение

Изменение естественного хода гидрометеорологических процессов в облаках, осуществляемое путем введения в них льдообразующих или гигроскопических реагентов для увеличения или уменьшения количества атмосферных осадков, имеет важное практическое значение. Целью проведения активных воздействий является снижение негативных последствий для экономики и населения от засухи, снижение пожарной опасности в лесах и на других природных территориях, улучшение погодных условий над заданными районами.

В настоящее время работы по активным воздействиям на облака осуществляются во многих странах мира. Используемые пиротехнические составы в качестве льдообразующего реагента, как правило, содержат от 2 до 20 % йодистого серебра (AgI). Это объясняется тем, что кристаллическая структура AgI аналогична структуре естественного льда. Исследования В. Я. Никандрова (1959) и Н. О. Плауде (1966) показали, что на частицах аэрозоля AgI

происходит образование кристаллов льда вследствие сублимации водяного пара. Впоследствии усилиями ФГБУ «ЦАО» разработаны более эффективные кристаллизующие реагенты «СК-1» и «СК-1-10» с порогом кристаллизующего действия $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. На их основе созданы новые средства засева облаков: пиропатроны, бортовые и наземные генераторы (Колосков и др., 2012).

В настоящее время задача повышения льдообразующей эффективности реагентов продолжает оставаться актуальной, приобретая большую практическую значимость и востребованность. Согласно последним исследованиям, достаточно перспективным направлением является использование добавок к основному пиротехническому составу, которые приводят к образованию частиц с кристаллической решеткой, близкой к кристаллической решетке льда (Колосков и др., 2012). В лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института проводились экспериментальные и теоретические исследования путей повышения льдообразующей эффективности кристаллизующих реагентов для противогололедных работ (Тапасханов и др, 2015; Хучунаев и др., 2014). Основной целью исследований являлось определение влияния химических компонентов, вводимых в пиротехнические составы, на выход льдообразующих частиц (с одного грамма реагента) и возможность повышения порога кристаллизующего действия.

Исследования значительного числа веществ позволило выявить ряд химических элементов, которые характеризуются высокой льдообразующей активностью и, вместе с тем, обладают достаточной термической устойчивостью, что позволяет использовать простые способы теплового и термомеханического диспергирования. Среди испытанных веществ высокой льдообразующей активностью по порогу кристаллизующего действия по выходу активных ядер кристаллизации обладает цинк (Хучунаев и др., 2020). В данной работе представлены лабораторные исследования льдообразующих свойств алюминия. В качестве экспериментального материала использовался порошок алюминия, в процессе возгонки которого были получены наноструктуры оксида алюминия Al_2O_3 .

В настоящее время теоретические работы, в полной мере описывающие механизм образования кластеров нанотрубок и нановолокон оксида алюминия и их льдообразующие свойства, отсутствуют. Основные данные в этой области знаний получены в результате экспериментальных исследований. В патенте С. А. Новопашина и А. И. Зайковского (2013) рассматривается возможный механизм образования полых нанотрубок оксида алюминия. Данный механизм был описан математически, и установлена формула соответствия между размерами начального агломерата и размерами образующейся полый частицы. При возгонке алюминия в среде водяного пара при температурах 600–800 °С происходит взаимодействие металла с водой, а при температуре 800–1200 °С — частичное восстановление алюминия.

Структурные и физические характеристики алюминия

Алюминий относится к группе легких металлов. По распространенности в земной коре он занимает 1-е место среди металлов. Вследствие высокой химической активности алюминий в природе находится только в связанном виде. В алюминии нет аллотропических превращений, т. е. его строение постоянно. Температура плавления у технического алюминия 660,32 °С, температура кипения — 2518,82 °С. Физические и химические свойства алюминия (легкий, прочный и антикоррозионный металл) позволяют использовать его как основное сырье в авиационной и авиакосмической промышленности, а нетоксичность соединений алюминия сделали его чрезвычайно востребованным при производстве кухонной посуды, алюминиевой фольги для пищевой промышленности и упаковки, что также важно для экологической чистоты реагента.

При всем при этом необходимо иметь ввиду, что по степени воздействия на организм человека активный оксид алюминия относится к 3-му классу, а алюминий к 4-му классу опасности по ГОСТ 12.1.005 (3-й класс — вещества умеренно опасные; 4-й класс — вещества малоопасные). Использование алюминия в целях повышения

льдообразующей эффективности штатного пиротехнического состава не должно оказать негативного воздействия на окружающую среду, так как для получения достаточного количества нанотрубок оксида алюминия потребуется небольшое количество металла.

Аппаратура и методика проведения эксперимента

Для проведения полного цикла эксперимента используется: большая облачная камера объемом 6,16 м³, малая облачная камера, устройство для возгонки реагента, ультразвуковой генератор, электронные весы, оптический микроскоп, термостатированные подложки (рис. 1). В большой облачной камере температура поддерживается в интервале от -1 до -12 °С.



Рис. 1. Схема типовой установки

Устройство для возгонки реагента размещается в малой облачной камере, которая трубой соединяется с большой облачной камерой. Такой подход позволяет избежать нагревания смеси пара с реагентом в большой облачной камере, что может сказаться на процессе формирования ледяных кристаллов. На электронных весах взвешивают определенное количество порошка алюминия, и закладывают на графитовую подложку устройства для возгонки

реагента. Большую облачную камеру охлаждают до требуемой температуры. На дно камеры устанавливают термостатированные подложки, накрытые крышками. Включают ультразвуковой генератор и создают искусственный туман в малой и большой облачной камерах. После чего производится термическая возгонка алюминия.

Далее с появлением в поле зрения первых ледяных кристаллов поочередно открывают крышки подложек. Каждую подложку с кристаллами извлекают из камеры и изучают под оптическим микроскопом. Затем определяют удельный выход льдообразующих ядер с кластеров нанотрубок оксида алюминия.

Расчет удельного выхода льдообразующих ядер производят по формуле:

$$A = 2,96 \cdot 10^{14} \frac{n_{кр}}{s_k} \quad (1)$$

где $n_{кр}$ — количество кристаллов в кадре; s_k — площадь кадра.

Коэффициент $2,96 \cdot 10^{14}$ получен как отношение площади основания большой облачной камеры ($2,96 \cdot 10^{12}$ мкм²) к массе сожженного реагента (0,01 г).

Результаты экспериментов по определению льдообразующих свойств кластеров из нанотрубок оксида алюминия

При оценке эффективности кристаллизующих реагентов основное внимание обращается на быстроедействие, оцениваемое по количеству активных льдообразующих ядер, образующихся в течение 2 минут после возгонки реагента (Абшаев и др., 2014).

На рисунке 2 представлены результаты исследования кинетики активации аэрозолей, генерируемых наиболее известными пиросоствами (Колосков и др., 2012). Для сравнения добавлены результаты исследования скорости нуклеации реагента на основе кластеров из нанотрубок оксида алюминия, полученные в ВГИ.

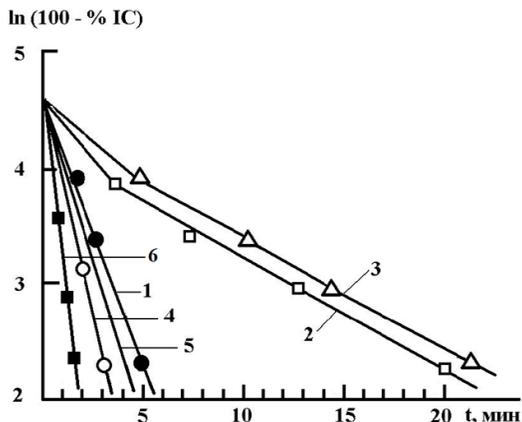


Рис. 2. Скорость нуклеации некоторых льдообразующих составов
 1 — BR-91-Y; 2 — 50-04-112 (измерения выполнены в Китае);
 3 — NEI-TB1; 4 — 50-04-11 (данные ЦАО);
 5 — 50-04-11 (данные Федер, Швейцария);
 6 — кластеры Al₂O₃ (измерения выполнены в ВГИ (Колосков и др., 2012))

Как видно из рисунка 1, в экспериментах ВГИ первые кристаллы начинают появляться уже через 2 мин после внесения смеси водяного пара и продуктов возгонки в большую облачную камеру.

Серии предварительных экспериментов по апробированию аппаратуры и методики исследования льдообразующих свойств кластера из нанотрубок оксида алюминия показали, что размер и форма кластеров зависят от температуры возгонки, давления и газовых составляющих среды, в которой происходит возгонка. Кластеры из нанотрубок оксида алюминия активно реагируют с водяным паром, образуя ледяные кристаллы различных форм и размеров.

Кластеры оксида алюминия исследовались с помощью электронной микроскопии в ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет». Изучение образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA4.

Микроскоп аттестован в Российской Федерации как средство измерения.

Характеристики сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA4:

- увеличение от 2 до 1000000 раз;
- разрешение 3 нм.

Фотография кластера из нанотрубок оксида алюминия под электронным микроскопом приведена на рисунке 3.

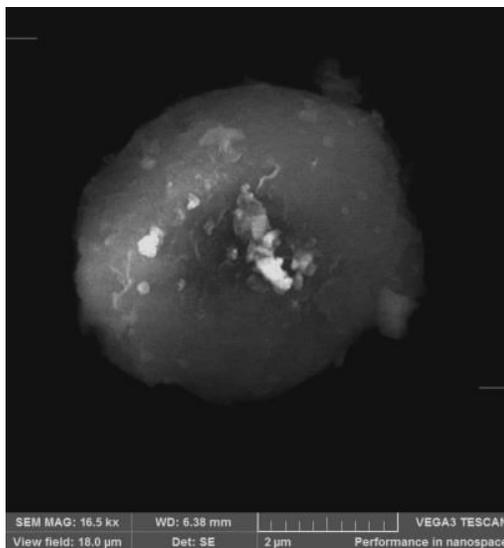


Рис. 3. Фотография кластера оксида алюминия под электронным микроскопом

Кластер оксида алюминия имеет сфероидальную форму и размер около 3 мкм. Он состоит из множества частиц оксида алюминия размерами от десятков до сотен нанометров.

В таблице 1 и на рисунке 4 представлены результаты экспериментальных исследований оксида алюминия в сравнении с пиротехническим составом АД-1.

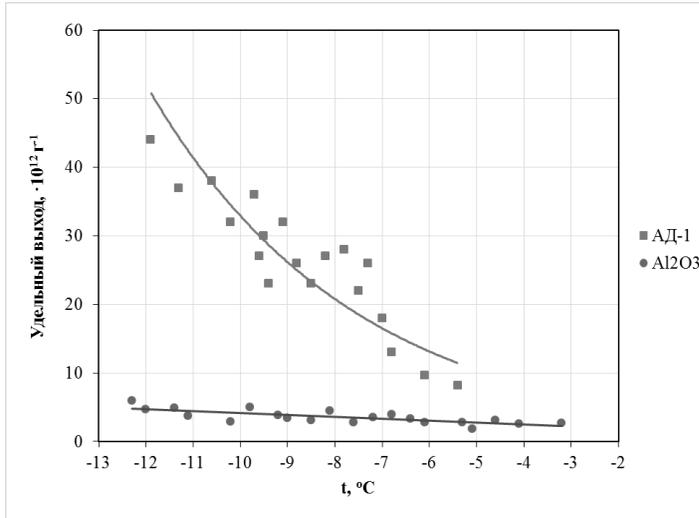


Рис. 4. Зависимость удельного выхода льдообразующих ядер частиц АД-1 и кластеров из нанотрубок Al_2O_3 от температуры

Таблица 1

Удельный выход штатного пиротехнического состава АД-1 и кластеров из нанотрубок оксида алюминия

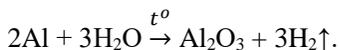
t, °C	Удельный выход, г ⁻¹	t, °C	Удельный выход, г ⁻¹
АД-1		Al ₂ O ₃	
-11,9	$4,4 \cdot 10^{12}$	-12,3	$5,9 \cdot 10^{11}$
-11,3	$3,7 \cdot 10^{12}$	-12,0	$4,7 \cdot 10^{11}$
-10,6	$3,8 \cdot 10^{12}$	-11,4	$4,9 \cdot 10^{11}$
-10,2	$3,2 \cdot 10^{12}$	-11,1	$3,7 \cdot 10^{11}$
-9,7	$3,6 \cdot 10^{12}$	-10,2	$2,9 \cdot 10^{11}$
-9,6	$2,7 \cdot 10^{12}$	-9,8	$5,0 \cdot 10^{11}$
-9,5	$3,0 \cdot 10^{12}$	-9,2	$3,8 \cdot 10^{11}$
-9,4	$2,3 \cdot 10^{12}$	-9,0	$3,4 \cdot 10^{11}$
-9,1	$3,2 \cdot 10^{12}$	-8,5	$3,1 \cdot 10^{11}$

Продолжение таблицы 1

t, °C	Удельный выход, г ⁻¹	t, °C	Удельный выход, г ⁻¹
<i>АД-1</i>		<i>Al₂O₃</i>	
-8,8	2,6·10 ¹²	-8,1	4,5·10 ¹¹
-8,5	2,3·10 ¹²	-7,6	2,8·10 ¹¹
-8,2	2,7·10 ¹²	-7,2	3,5·10 ¹¹
-7,8	2,8·10 ¹²	-6,8	4,0·10 ¹¹
-7,5	2,2·10 ¹²	-6,4	3,3·10 ¹¹
-7,3	2,6·10 ¹²	-6,1	2,8·10 ¹¹
-7,0	1,8·10 ¹²	-5,3	2,8·10 ¹¹
-6,8	1,3·10 ¹²	-5,1	1,8·10 ¹¹
-6,1	9,6·10 ¹¹	-4,6	3,1·10 ¹¹
-5,4	8,2·10 ¹¹	-4,1	2,6·10 ¹¹
		-3,2	2,7·10 ¹¹

Лабораторные исследования показали, что удельный выход льдообразующих ядер кластера из нанотрубок оксида алюминия составляет от $2,7 \cdot 10^{11}$ до $4,7 \cdot 10^{11}$ г⁻¹ во всем диапазоне принятых температур: от -3 до -12 °C. Очевидно, что удельный выход льдообразующих ядер из кластеров нанотрубок оксида алюминия меньше, чем при возгонке пиротехнического состава АД-1, но порог срабатывания этого реагента повысился до -3 °C. Такой результат выхода активных льдообразующих частиц в диапазоне исследуемых температур объясняется тем, что нанотрубки оксида алюминия — закрытые, поэтому эффект с образованием льдоподобной структуры в них не наблюдается.

Еще одной причиной снижения удельного выхода льдообразующих ядер нанотрубок оксида алюминия может быть реакция алюминия с парами воды при высокой температуре, сопровождающаяся образованием оксида алюминия и выделением водорода:



Водород в свою очередь разрушает оксидный слой алюминия, понижает температуру возгонки и приводит к возгоранию алюминия, при котором с подложки выбрасываются капли алюминия диаметром 10–20 мкм, что в свою очередь приводит к уменьшению удельного выхода льдообразующих ядер.

Следует отметить, что принципиальная возможность и целесообразность использования алюминия в качестве добавки к основному пиротехническому составу вытекает из того факта, что идет быстрый рост агрегатов кристаллов оксида алюминия и порог срабатывания повышается до $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эти факты позволяют рассчитывать на возможность использования активных воздействий для уменьшения «непроизводительных» потерь облачной влаги и, тем самым, повышения эффективности осадкообразования.

Известно, что лишь часть водосодержания облаков при естественных процессах реализуется в виде осадков. Так, Р. Брахам (1952) констатирует, что при грозах только 19 % сконденсированной в облаке влаги выпадает в виде дождя на землю. В работе П. Вукоффа (1996) из конвективного облака выпадает на землю только 10 % общей массы содержащейся в нем жидкой воды, а из орографических облаков, сформировавшихся во влажном морском воздухе, естественным образом выпадает лишь 25–30 % влаги. Р. Элиот (1960) в результате теоретических оценок получил, что в виде осадков из облаков кучевых форм выпадает 50–70 % заключенной в них влаги.

Заключение

Принимая во внимание тот факт, что кластеры нанотрубки Al_2O_3 обладают льдообразующими свойствами с порогом кристаллизующего действия $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, можно рекомендовать использовать кластеры оксида алюминия на основе исходного льдообразующего топлива АД-1 для получения более эффективного пиротехнического состава для оснащения метеорологических ракет, предназначенных для активных воздействий на облачные процессы; стимулирования более раннего и быстрого (чем при естественном ходе процесса) осадкообразования в областях будущего

градообразования, преждевременное выпадение которых может привести к вымыванию водности областей будущего градообразования, аэродинамическому торможению и подавлению слабых еще восходящих потоков и ликвидации условий градообразования (Абшаев, Дадали, 1973); а также при создании перспективных наземных генераторов для активных воздействий на туманы с точки зрения обеспечения безопасности работы авиации и дорожно-транспортных коммуникаций.

Если говорить о практической значимости, то большую роль играет широкое распространение алюминия в природе и его дешевизна по сравнению с серебром (более, чем на 2 порядка). Таким образом, использование алюминия позволит существенно снизить стоимость реагента и технологии воздействия в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Барекова М. В., Малкарова А. М. (2014). Руководство по организации и проведению противорадовых работ — Нальчик: ВГИ. С. 314-318.

Абшаев М. Т., Дадали Ю. А. (1973). Некоторые вопросы воздействия на градовые процессы // Труды ВГИ. Вып. 22. С. 104–116.

Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. (2012). Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов — СПб: РГГМУ. 342 с.

Никандров В. Я. (1959). Искусственные воздействия на облака и туманы — Л.: Гидрометеиздат. 191 с.

Новопашин С. А., Зайковский А. В., Смовж Д. В., Калюжный Н. А. (2013). Способ синтеза полых наночастиц $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ / RU 2 530 070 С1. Заявка 2013119014/02, 23.04.2013.

Плауде Н. О. (1966). К вопросу о механизме кристаллизации переохлажденного тумана аэрозолем йодистого серебра // Труды ГГО. Вып. 186. С. 10–17.

Тапасханов В. О., Хучунаев Б. М., Хучунаев А. Б., Панаэтов В. П. (2015). Предварительные результаты исследования льдообразующих свойств нанотрубок оксида цинка и AgI / В сборнике: Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбурской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. — С. 191-195.

Хучунаев Б. М., Байсиев Х.-М. Х., Геккиева С. О., Будаев А. Х. (2020). Экспериментальные исследования льдообразующей эффективности пиротехнического состава АД-1 с добавками цинка // Труды ГГО. Вып. 597. С. 51–60.

Хучунаев Б. М., Ташилова А. А., Теунова Н. В., Ажахова Р. А. (2014). Экспериментальное исследование взаимодействия реагента AgI с искусственной облачной средой // Труды ВГИ. № 99. С. 23–30.

Braham R. R. (1952). The water and energy budgets of the thunderstorm and their relation to thunderstorm development // J. Meteorol. V 9. P. 227–242.

Eliot R. (1960) Seeding of West Coast winter storms // J. Irig. Drain. Div. — Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.

Wysocki P. H. (1996) Evaluation of the state of the art. / In: Human dimensions of weather modification — University of Chicago, Dept. of Geography. — Research Paper № 105. P. 27–39.

**РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ ПРОГНОЗА ГРАДА
ПО ВЫХОДНЫМ ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
АТМОСФЕРЫ В ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ
СЕВЕРО-КАВКАЗСКОЙ ВОЕНИЗИРОВАННОЙ СЛУЖБЫ**

М. Ч. Залиханов, А. Х. Кагермазов, Л. Т. Созаева

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: ka5408@mail.ru

Поступила в редакцию 13.09.2023
Поступила после доработки 25.10.2023

Введение

Основу краткосрочного прогноза погоды, т. е. прогноза детализированных в пространстве и времени полей метеорологических элементов и локальных явлений, составляют три метеорологических метода — синоптический (качественный или расчетный), статистический (формальный) и гидродинамический (численный). В настоящее время, несмотря на достигнутое развитие численных подходов решения задач прогноза конвективной облачности, прогнозирование сопутствующих опасных явлений погоды заметно отстает. Наиболее распространенным методом краткосрочного прогноза опасных конвективных явлений погоды по-прежнему остается физико-статистический, основанный на интерпретации информации об условиях возникновения и развития этих явлений. Этот метод позволяет распознавать явления по комплексу термогидродинамических параметров атмосферы.

В прогнозировании опасных конвективных явлений погоды можно выделить методы, разработанные в Гидрометцентре России

А. А. Алексеевой и Н. И. Глушковой (Алексеева, Глушкова, 2001). Однако их неудобство заключается в необходимости использования исходной информации, получаемой в ходе сложных расчетов, что не всегда позволяет применять их в оперативной работе метеорологических подразделений низового звена и службах по активному воздействию на гидрометеорологические процессы.

Попытки уменьшения субъективного фактора в прогнозе града, как одного из трудно предсказуемых опасных явлений погоды, в последние годы предпринимаются также в Высокогорном геофизическом институте (Кагермазов, 2012).

Отмечающийся во всех исследованиях дефицит исходной информации связан с тем, что при прогнозировании опасных явлений погоды (а именно града) в основном используются фактические данные аэрологического зондирования. В нашей стране сеть аэрологического радиозондирования атмосферы довольно редкая, а время проведения измерений и их частота не соответствуют моменту максимального развития конвекции. Вместе с тем в настоящее время появились глобальные модели атмосферы, выходная продукция которых может использоваться для замены данных фактического аэрологического зондирования (Kalnay et al., 1990; Kanamitsu, 1989; Kanamitsu et al., 1991).

Исследования выявили хорошее совпадение параметров атмосферы, полученных по выходной продукции глобальной модели атмосферы GFS NCEP, и фактических данных аэрологического зондирования для центральной части Северного Кавказа, что сделало правомочным прогнозирование града по данным глобальной модели атмосферы (Кагермазов, Созаева, 2020).

Кабардино-Балкарская Республика расположена в центральной части северного макросклона Кавказа. Территория характеризуется разнообразными физико-географическими и климатическими условиями, включающими различные природные зоны, области со сложным рельефом, что приводит к формированию местных метеорологических особенностей. Территория республики разделена на три основные геоморфологические зоны: горную, предгорную

и равнинную. Горная и предгорная зоны занимают большую часть территории субъекта.

Целью данного исследования является представление результатов апробации предлагаемого подхода по прогнозированию града в зоне ответственности Северо-Кавказской военизированной службы по борьбе с градом. Для этого решались следующие задачи:

- расчет параметров атмосферы по выходным данным глобальной модели атмосферы и последующее прогнозирование града;
- сопоставление результатов прогнозирования града с данными наблюдений;
- оценка критериев качества предлагаемого прогноза града группой методов.

Для прогнозирования града был использован авторский программный продукт (Кагермазов, 2018).

Материалы и методы исследования

Материалами для настоящего исследования послужили выходные прогностические данные глобальной модели атмосферы с заблаговременностью 30 ч в градоопасный сезон 2023 г. Эта информация, заменяя собой данные фактического аэрологического зондирования применялась для точки с координатами 43°40' с. ш. и 44°05' в. д., соответствующей приблизительно центру территории, находящейся в зоне ответственности ФГБУ Северо-Кавказской военизированной службы по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы. В эту зону входят Кабардино-Балкарская Республика, Республика Северная Осетия-Алания и Карачаево-Черкесская Республика. Этой же службой были предоставлены фактические данные наблюдений.

Программа расчета параметров атмосферы и последующего прогноза града «PROGNOZ GRADA» разработана на языке программирования Fortran и состоит из главной программы и четырех подпрограмм, предназначенных для ввода данных, вывода результата,

вычисления термодинамических и других параметров атмосферы и конвективного облака (рис. 1).

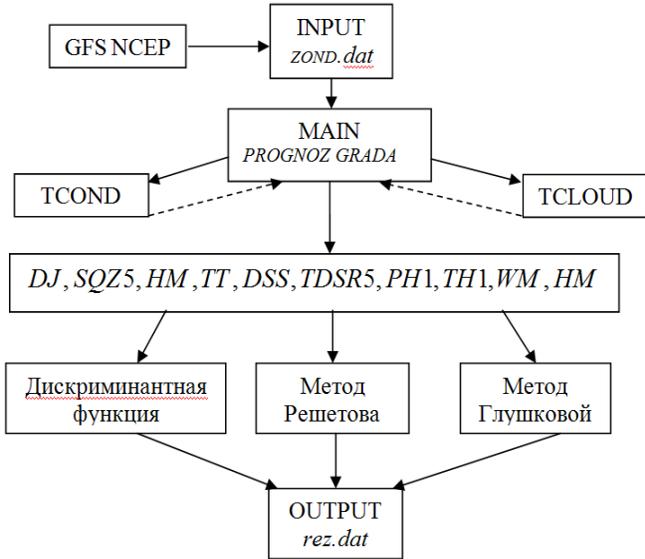


Рис. 1. Структурная схема программы расчета параметров атмосферы и прогноза града «PROGNOZ GRADA»

Главная программа предназначена для прогнозирования града по следующим параметрам:

DJ — индекс неустойчивости Джорджа;

SQZ5 — суммарная удельная влажность в слое земля - 5 км;

HM — уровень, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе максимальна;

TT — индекс интегральной суммы Миллера;

DSS — энергетическая характеристика подоблачного слоя;

TDSR5 — средний дефицит влажности в слое выше уровня конвекции на 5 км;

PH1 — уровень конвекции;

TH1 — температура на уровне конвекции;

WM — скорость восходящих потоков в облаке;

HM — уровень, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе максимальна.

Подпрограмма INPUT предназначена для ввода выходной продукции глобальной модели атмосферы (файл ZOND.dat — аналог данных аэрологического зондирования). Файл включает прогностические поля температуры воздуха и точки росы, направления и скорости ветра на стандартных уровнях (подстилающая поверхность, 950, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300 и 200 гПа).

Подпрограмма SUBROUTINE TCOND рассчитывает температуру конденсации водяного пара в атмосфере на любой высоте и температуры облачных частиц по формулам:

$$T_k = T_{3m} \left(\frac{622 \cdot 6,1078}{P_3 q_3} \right)^{0,286} e^{0,286 \left(1 - \frac{273}{T_k} \right)},$$

где T_{3m} — максимальная температура, К; P_3 — атмосферное давление, гПа; q_3 — удельная влажность, г/кг (все параметры — на уровне подстилающей поверхности).

$$dT_{bi} = \frac{ART_{bi} + Lq_m \cdot 10^{-3}}{C_p + \frac{L^2 q_m \cdot 10^{-3}}{AR_n T_{bi}^2}} \frac{dP}{P} \frac{\frac{AR}{C_p} T_{bi} + \frac{L}{C_p} q_m \cdot 10^{-3}}{1 + \frac{L^2 q_m \cdot 10^{-3}}{A C_p AR_n T_{bi}^2}} \frac{dp}{p},$$

где T_{bi} — температура частицы воздуха, определяемая по влажной адиабате;

$$\frac{AR}{C_p} = 0,286, \quad \frac{L}{C_p} = 2490 \quad \text{при } T_{bi} > 0;$$

$$\frac{L}{C_p} = 2863 \quad \text{при } T_{bi} < 0;$$

$$\frac{L^2}{AC_p R_n} = 13636,35 \text{ при } T_{bi} > 0;$$

$$\frac{L^2}{AC_p R_n} = 17454,58 \text{ при } T_{bi} < 0.$$

Подпрограмма OUTPUT формирует выходной файл *rez.dat* и выводит результат прогнозирования на экран монитора.

Последовательное обращение к подпрограммам TCOND и TCCLOUD позволяет рассчитать стратификацию температуры смоченного термометра и определить псевдопотенциальную температуру смоченного термометра на любом уровне, включая уровень конденсации.

Главная программа MAIN позволяет прогнозировать град группой методов: по дискриминантной функции и по методикам Решетова и Глушковой.

Прогноз града по дискриминантной функции с помощью наиболее информативных параметров представлен в виде (Кагермазов, 2012):

$$L = 0,0557 D_j + 0,0696 \sum_{земля}^{500} q + 0,0002 H_p + 0,036 TT + \\ + 0,0069 \Delta S + 0,057 \Delta \tau_{cp} - 20,31 \quad (1)$$

где $D_j = (T_{850} - T_{500}) + \tau_{850} - (T_{100} - \tau_{100})$ — индекс неустойчивости Джорджа;

H_p — высота слоя потенциальной неустойчивости;

$TT = T_{850} + \tau_{850} - 2T_{500}$ — индекс интегральной суммы Миллера;

$\sum_{земля}^{500} q$ — суммарная удельная влажность в 5-километровом слое

над подстилающей поверхностью

$\Delta \tau_{dcp}$ — суммарный дефицит точки росы в 5 км слое от уровня конденсации;

ΔS — энергетическая характеристика подоблачного слоя.

Комплексный параметр ΔS является количественной характеристикой энергетического состояния нижнего слоя тропосферы, который численно равен разности между работой, совершаемой подъемной силой при перемещении единицы массы сухого воздуха от подстилающей поверхности до уровня конденсации, и работой, которую может совершить опускающийся с уровня конденсации воздух в подоблачном слое (Беленцова и др., 1982).

По дискриминантной функции (1) при $L \geq 0$ прогнозируется «град», при $L < 0$ — «не град».

В методе прогноза града по Г. Д. Решетову главными параметрами, ответственными за образование града, являются высота верхней границы конвективного облака и температура на этой высоте (Решетов, 1981). Причем, благодаря приобретенному значительному запасу кинетической энергии облачные частицы по инерции поднимаются выше уровня пересечения кривой состояния температуры облака с кривой стратификации, пока в верхней части облака скорость не уменьшится до нуля. За высоту верхней границы облака принимается уровень, на котором отрицательная и положительная энергии неустойчивости становятся равными. В этом случае град прогнозируется по формуле:

$$R = (0,00052PH1 - 0,12(TH1 - 273,0)) - 4,73. \quad (2)$$

При $R \geq 0$ прогнозируется град, при $R < 0$ — град не прогнозируется.

В методе прогноза града, разработанном в Высокогорном геофизическом институте, заложены следующие условия, необходимые для образования града в облаке (Глушкова, Минакова, 1967):

– максимальная скорость конвективного потока (WM) должна превышать 10 м/с, т. е. величину, при которой происходит накопление влаги в облаке и восходящий поток может поддерживать градину радиусом 0,5 см;

– уровень максимальной скорости восходящего потока (HM) в облаке должен находиться выше уровня нулевой изотермы, при этом температура на этом уровне должна составлять $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже.

При разработке этого метода были использованы натурные исследования, проведенные в Высокогорном геофизическом институте, а также экспериментальные данные о температуре и влажности, при которых в облаке создаются условия, необходимые для роста градин.

В выходном файле *rez.dat* приводятся параметры, используемые при прогнозе града (параметры, входящие в формулы (1) и (2)).

Град прогнозируется в том случае, если два из трех вышеописанных методов дают положительный результат.

Для оценки успешности предлагаемого метода прогноза града составляется таблица сопряженности с количественными элементами:

- оправдавшихся прогнозов с формулировкой «град»;
- неоправдавшихся прогнозов с формулировкой «град»;
- неоправдавшихся прогнозов с формулировкой «не град»;
- оправдавшихся прогнозов с формулировкой «не град».

По таблице сопряженности рассчитываются основные параметры для оценки прогнозов градовой опасности:

- общая оправдываемость прогноза;
- предупрежденность наличия явления.

В качестве дополнительных показателей для оценки прогнозов градовой опасности определяются:

- оправдываемость прогноза наличия явления;
- оправдываемость отсутствия явления;
- предупрежденность отсутствия явления.

Кроме того, рассчитываются критерии качества прогнозов Пирси — Обухова, надежности по Н. А. Багрову и точности по А. М. Обухову, а также ошибка риска метода (явление не прогнозировалось, но наблюдалось) и ошибка страховки метода (явление прогнозировалось, но не наблюдалось).

Результаты исследований и их обсуждение

Апробация программных модулей расчета метеопараметров и прогноза града проводилась в два этапа: на первом выполнялось прогнозирование града, на втором — сопоставление фактического явления «град» — «не град» с результатами прогноза.

Прогноз града по глобальной модели атмосферы с составлялся ежедневно заблаговременностью 30–36 ч. Данные выбирались по географическим координатам, соответствующим центру защищаемой территории.

Разделение явлений на «град» или «не град» осуществлялось по данным наблюдений военизированной службы по активному воздействию на рассматриваемой территории.

В расчет было принято 109 событий, из которых в 34 случаях был зафиксирован град, а в 75 случаях града не было. Прогноз считался оправдавшимся в тех случаях, когда град фиксировался у подстилающей поверхности по данным наземных наблюдений, а в облаке — по данным радиолокационных наблюдений.

Таблица сопряженности (табл. 1) позволила рассчитать критерии качества прогноза града (табл. 2).

Результаты апробации показали, что предлагаемый метод прогноза града по данным глобальной модели атмосферы с заблаговременностью 30 ч соответствует всем критериям качества прогнозов.

Полученные результаты сравнивались с аналогичными результатами прогноза града по данным фактического аэрологического зондирования в срок 6:00 ч (Кагермазов, Сиротенко, 2010).

При использовании прогностических значений метеопараметров атмосферы общая оправдываемость прогноза града составила 87 %, а предупредительность наличия явления — 76 %. Это свидетельствует о заметном преимуществе расчетной программы «PROGNOZ GRADA» по сравнению со случаем применения фактического аэрологического зондирования, для которого параметры оценки прогнозов составили соответственно 76 и 68 %.

Таблица 1

Таблица сопряженности

Прогноз	Наблюдения явления		Сумма
	град	не град	
град	26	6	32
не град	8	69	77
сумма	34	75	109

Таблица 2

Критерии качества прогноза града с заблаговременностью 30 ч

№	Наименование критериев качества прогноза	Критерии качества прогноза
1	Общая оправдываемость прогноза	87,0
2	Предупрежденность наличия явления	76,0
3	Оправдываемость прогноза наличия явления	81,3
4	Оправдываемость отсутствия явления	89,6
5	Предупрежденность отсутствия явления	92,0
6	Критерий качества прогнозов Пирси — Обухова	0,68
7	Критерий надежности по Н. А. Багрову	0,70
8	Ошибка риска метода	0,24
9	Ошибка страховки метода	0,08
10	Критерий точности по А. М. Обухову	0,68

Анализ неоправдавшихся прогнозов показал, что большая часть из них приходится на дни, когда град наблюдался в горных и предгорных территориях, погодные условия которых сильно отличаются от условий степной части региона, для которого составлялся прогноз града.

К недостатку метода следует отнести невозможность учета сложной орографии, что частично можно преодолеть, если использовать выходные данные глобальной модели, характерные для этих территорий.

Заключение

По результатам апробации предлагаемого подхода к прогнозированию града с заблаговременностью до 30 ч и анализа их успешности можно сделать вывод, что испытываемый метод соответствует критериям качества прогнозов. Следовательно, использование предлагаемого программного продукта для прогноза града (и других опасных явлений) имеет хорошие перспективы для внедрения в оперативную практику служб по борьбе с градом.

Улучшения качества прогнозов можно добиться при использовании прогностических данных отдельно для каждой природной зоны региона (степной, предгорной и горной), что будет реализовано на следующем этапе исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева А. А., Глушкова Н. И. (2001). Способ прогноза стихийных конвективных гидрометеорологических явлений теплого полугодия / Патент РФ № 2162237.2001. Патентообладатель Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации.

Алексеева А. А. Методика прогноза опасных и стихийных конвективных явлений погоды, а также их совокупности, приносящих значительный ущерб отраслям экономики / Методический кабинет Гидрометцентра. [Электронный ресурс]. URL: <http://method.meteorf.ru/danger/economy/economy.html> (дата обращения: 14.04.2021).

Беленцова В. А., Гораль Г. Г., Терскова Т. Н., Федченко Л. М., Чеповская О. И. (1982). Аэросиноптические и термодинамические особенности возникновения и развития интенсивных градобитий и шквалов в условиях Северного Кавказа // Труды ВГИ. Вып. 51. С. 88–99.

Глушкова Н. И., Минакова Е. Е. (1967). Прогноз града. Дополнение к руководству по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. II. — М.: Гидрометеиздат. 10 с.

Кагермазов А. Х. (2012). Прогноз града по выходным данным глобальной модели атмосферы (T254 NCEP) // Метеорология и гидрология. № 3. С. 28–34.

Кагермазов А. Х. (2018). Альтернативный прогноз града по выходным данным глобальной модели атмосферы GFS NCEP «PROGNOZ GRADA». Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018661467 от 07.09.2018. Заявка № 2018618374 от 06.08.2018.

Кагермазов А. Х., Сиротенко Л. А. (2010). Результаты апробации программных модулей расчета метеопараметров и компьютерного прогноза града по данным аэрологического зондирования на Северном Кавказе // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Физика атмосферы. Естественные науки. Спецвыпуск. С. 49–53.

Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. (2020). Прогноз града с заблаговременностью до трех суток по выходным данным глобальной модели атмосферы // Труды ГГО. Вып. 598. С. 204–214.

Решетов Г. Д. (1981). Метод прогноза града для авиации на 12–36 ч. (Пособие для синоптиков). — Л.: Гидрометеиздат. 126 с.

Kalnay E., Kanamitsu M., Baker W. E. (1990). Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center // Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 71. P. 1410–1428.

Kanamitsu M. (1989). Description of the NMC global data assimilation and forecast system // Wea. and Forecasting. V. 4. P. 335–342.

Kanamitsu M., Alpert J. C., Campana K. A., Caplan P. M., Deaven D. G., Iredell M., Katz B., Pan H.-L., Sela J., White G. H. (1991). Recent changes implemented into the global forecast system at NMC // Wea. and Forecasting. V. 6. P. 425–435.

УДК 551.501.85

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ КАБАРДИНО-БАЛКАРИИ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ И ЧАСТОТЕ ГРАДОБИТИЙ

В. С. Инюхин, Е. А. Чередник

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: inuhin51@mail.ru,
elena.cherednik@mail.ru

Поступила в редакцию 18.09.2023
Поступила после доработки 17.10.2023

Введение

Некоторым территориям Северного Кавказа значительный ущерб наносят градобития, от которых в первую очередь страдает сельское хозяйство. Необходимо иметь в виду, что град обычно сопровождается грозами, интенсивными ливнями и ураганным ветром, которые усиливают разрушительную силу градобитий. Федеральный закон «О развитии сельского хозяйства» определяет территории, неблагоприятные для производства сельскохозяйственной продукции. Росгидромет полагает необходимым определить районы с интенсивными и частыми градобитиями как территории с неблагоприятными для производства сельскохозяйственной продукции.

Как известно, наиболее градоопасными территориями Российской Федерации являются Краснодарский и Ставропольский край, а также республики Северного Кавказа: Карачаево-Черкесская, Кабардино-Балкарская и Республика Северная Осетия-Алания. Эти территории расположены в сложных физико-географических условиях, близость

бассейна Черного моря, лежащего на пути западных вторжений, способствует формированию неустойчивой воздушной массы с повышенным увлажнением, что является оптимальным условием для активизации конвективных процессов и развития градовых облаков. Когда к этим факторам добавляется проникновение арктической воздушной массы с севера, возникают уникальные синоптические условия, формирующие холодные фронты с экстремальным контрастом температур. Именно в такие дни отмечаются градовые облака, с которыми связаны интенсивные градобития. Сильные градобития наносят значительный ущерб сельскохозяйственным растениям. При этом материальные потери могут составлять десятки или сотни миллионов рублей. Наиболее подвержены градобитию в начале лета озимая пшеница, кукуруза, ячмень. Град с суммарной кинетической энергией 500 Дж/м^2 наносит 100%-й ущерб озимой пшенице. Многолетние исследования, проведенные по радиолокационным данным, показали, что в среднем за сезон на территории Кабардино-Балкарии наблюдается 30 дней с градом (Инюхин и др., 2017). Наиболее часто град выпадает в горных и предгорных районах, значительно реже на равнине (Абшаев и др., 2014).

Целью данной работы является выявление территорий с высокой градовой активностью и определение районов Кабардино-Балкарской республики, неблагоприятных для производства сельскохозяйственной продукции.

Исходные материалы и методы исследований

Радиолокационные наблюдения градовых облаков проводились на научно-исследовательском полигоне ВГИ на автоматизированном двухволновом радиолокаторе МРЛ-5. Материалы многолетних радиолокационных наблюдений градовых процессов были собраны в базе радиолокационных данных (БД) (Березинский и др., 2017), установленной на сервере отдела активных воздействий ВГИ. В БД в первую очередь заносятся параметры, определяющие положение ячейки: расстояние от радиолокатора R и азимут A точки

максимальной радиолокационной отражаемости внутри ячейки на длине волны 10 см. Координаты ячейки могут быть определены относительно радара по формулам:

$$\begin{aligned} X_{я} &= X_{рад} + R \cdot \sin(A), \\ Y_{я} &= Y_{рад} + R \cdot \cos(A), \\ Z_{я} &= Z_{рад} + R \cdot \sin(\beta), \end{aligned} \quad (1)$$

где $X_{я}$, $Y_{я}$ и $Z_{я}$ — координаты ячейки, $X_{рад}$, $Y_{рад}$ и $Z_{рад}$ — координаты радара, $Z_{рад}$ — высота над уровнем моря, R — расстояние от радара, β — угол места антенны.

В задачах районирования территории по частоте градобитий в БД вводится структурная единица — таксон. Каждый такой таксон может быть представлен рядом характерных консервативных (независимых от времени) признаков (например, название административного района КБР), а также переменными параметрами (например, количеством и интенсивностью градобитий).

По значениям азимута Az и расстояния от радиолокатора R рассчитывается номер таксона N , в котором расположена конвективная ячейка.

$$N = \text{int}\left(\frac{L}{2} + 1 + \frac{R \sin(Az)}{n}\right) + \left[\text{int}\left(\frac{L}{2} + 1 + \frac{R \cos(Az)}{n}\right) - 1 \right] \cdot L, \quad (2)$$

где L — число таксонов по горизонтали и вертикали; n — определяется базовым размером таксона.

Использование БД позволило в значительной мере автоматизировать процесс получения необходимых результатов за счет разработки и выполнения соответствующих запросов к базе данных.

Создавая соответствующие запросы к базе данных, для каждого административного района КБР было получено количество градобитий по годам и за всё время наблюдений. При этом определение областей

локализации града в облаке и место его выпадения у поверхности земли проводится в соответствии с двухволновым методом индикации града по отражаемости на двух длинах волн ($\lambda = 3,2$ и 10 см) (Abshaev и др., 1994; Абшаев, 1968; Абшаев и др., 1980; Инюхин, 2021; Инюхин и др., 2022а; Инюхин, 2017) при детальном учете ослабления радиолокационного сигнала в градовых облаках и осадках (Инюхин и др., 2019; Инюхин и др., 2014).

Результаты исследований и их обсуждение

На основании информации о градобитиях, занесенной в базу радиолокационных данных, строилась карта выпадения града за каждый рассматриваемый год. Для примера на рисунке 1 представлена карта повторяемости градобитий на территории Кабардино-Балкарии и прилегающих территорий в 2011 г.

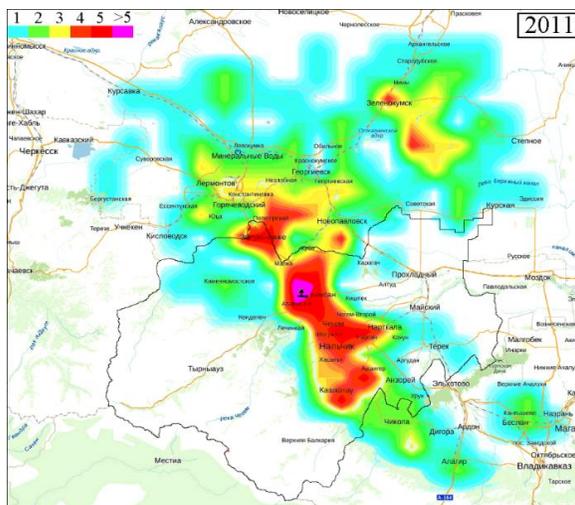


Рис. 1. Частота повторения (градобитий/год) в 2011 г.

Как видно из рисунка, в 2011 г. град выпадал преимущественно двумя полосами, параллельными главному Кавказскому хребту. Первая — на севере в Ставропольском крае от района г. Зеленокумск до Ростовановского водохранилища на границе с КБР. Вторая, более мощная — на юге от района Минеральных Вод до селений Дур-Дур и Карман РСО-Алания. Эта полоса проходит через населенные пункты Пятигорск, Залукокоаже, Малка, Баксан, Чегем, Шалущка, Нальчик, Хасанья, Аушигер, Кашхатау, Чикола, Алагир. Больше всего случаев выпадения града в 2011 г. было в предгорных зонах Зольского, Баксанского, Чегемского, Черекского районов. В равнинной части республики град почти не наблюдался.

Для определения интенсивности градовых осадков в 2011 г. по данным (Инюхин и др. 2022б) были вычислены микрофизические характеристики градовых осадков и построены гистограммы распределения некоторых из них. Гистограммы повторяемости максимального размера градовых частиц в градобитиях 2011 г. и потока кинетической энергии выпадающего града приведены на рисунке 2.

Анализ гистограмм на рис. 2 показывает, что градовые процессы в 2011 г. были слабой и средней интенсивности, т. к. максимальный размер падающих градин в 37 % случаев составлял 2,0–2,5 см, и только 3 % случаев градобития имели максимальный размер градин больше 3,5 см.

Максимальный поток кинетической энергии града в 41 % случаев составлял 0,14–0,82 Дж/(см²·с), и только 4,5 % случаев градобития имели поток кинетической энергии града больше 3,55 Дж/(см²·с).

Для обобщения результатов аналогичным образом были обработаны данные за период с 2003 по 2022 гг. Для оценки степени гадоопасности каждого из административных районов республики полученная интегральная карта градобитий была наложена на административную карту Кабардино-Балкарии. Поля выпадения града могут быть получены только с использованием радиолокационной информации, поэтому выполненный анализ является единственной возможностью оценить степень гадоопасности каждого административного района и выявить критерии отнесения

территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции.

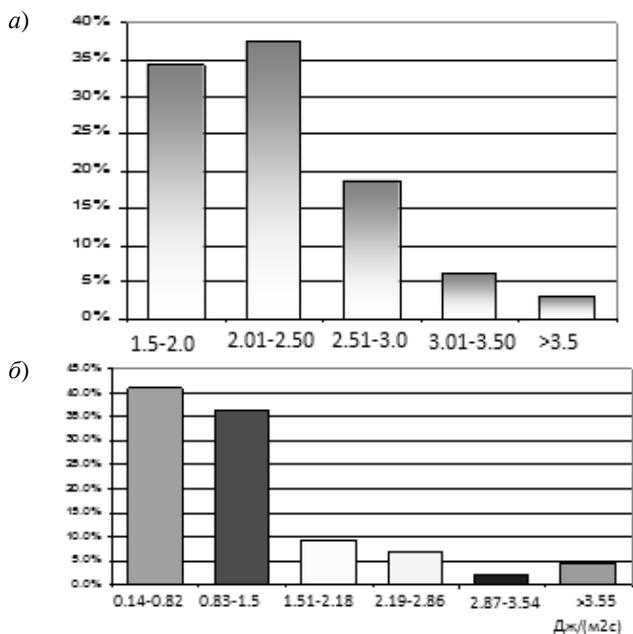


Рис 2. Повторяемость максимального размера градových частиц в 2011 г. (а) и потока кинетической энергии выпадающего града (б)

На рис. 3 представлена такая карта интегральной градоопасности региона исследования на фоне административной карты Кабардино-Балкарии. Представленный рисунок дает полное представление о распределении мест выпадения града по территории республики в период с 2003 по 2022 гг. Рисунок отражает общую тенденцию выпадения градových осадков — преимущественно в горной и предгорной зонах республики. При этом именно в предгорной зоне наблюдается максимум повторяемости выпадений града за указанный период. В степных районах республики (Прохладненском, Майском и Терском) выпадений града значительно меньше.

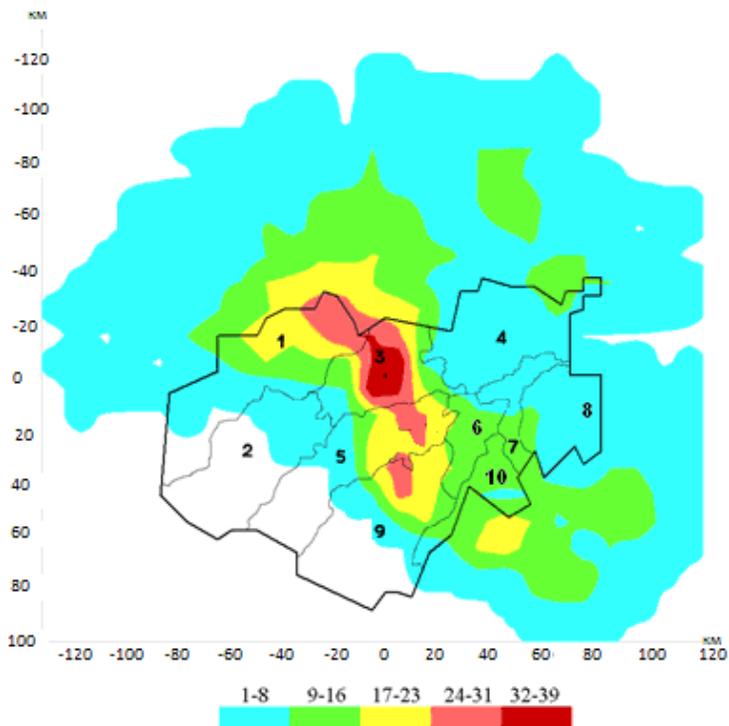


Рис. 3. Интегральная градоопасность Кабардино-Балкарской республики (количество градобитий за 2003–2022 гг):

- 1 – Зольский, 2 – Эльбрусский, 3 – Баксанский, 4 – Прохладненский,
 5 – Чегемский, 6 – Урванский, 7 – Майский, 8 – Терский,
 9 – Черекский, 10 – Лескенский административные районы

Анализ рис. 3 показывает, что максимум повторяемости выпадения града в указанный временной период приходился на территорию центральной части Баксанского района. Именно здесь отмечались таксоны с наибольшим количеством выпадения града. Здесь следует отметить, что речь идет о количестве градобитий на данной территории, а не о числе дней с выпадением града. В течение одного дня наблюдений над одной и той же территорией могут пройти

несколько градовых ячеек. В этом случае радиолокатор регистрирует несколько случаев выпадения града. Как видно из рис. 3, высокие значения градоопасности отмечаются также в северной части Черекского района и в городском округе Нальчик.

Рисунок 3 дает качественное представление о распределении мест выпадения града над территорией исследования. Для более объективного анализа степени градоопасности каждого конкретного района республики в данной работе предлагается введение регионального показателя градоопасности k_i за исследуемый период, который определяется отношением числа выпадения града к общей площади района, подверженного градобитию. В таблице 1 для каждого района республики приводятся значения регионального показателя градоопасности k_i за исследуемый период и превышение регионального показателя градоопасности над средним значением $k_i / k_{ср}$.

Таблица 1

**Показатель градоопасности k_i для административных районов
Кабардино-Балкарской республики**

Муниципальные районы КБР	Площадь района км ²	Количество градобитий	k_i	$k_i / k_{ср}$
Баксанский район	829	131	0,16	2,15
Зольский район	2124,5	161	0,08	1,03
Лескенский район	523,1	73	0,14	1,90
Майский район	384	13	0,03	0,46
Прохладненский район	1342	54	0,04	0,55
Терский район	893	41	0,05	0,62
Урванский район	458	42	0,09	1,25
Чегемский район	1503	130	0,09	1,18
Черекский район	2215	117	0,05	0,72
Эльбрусский район	1850	19	0,01	0,14

Как видно из таблицы, наибольшее число выпадений града отмечалось в Зольском районе республики, однако, наибольшее

значение k_i имеет Баксанский район. Именно на территории этого района и отмечался максимум числа выпадения града согласно рисункам 2 и 3. Среднее значение k_i по всем десяти районам республики k_{cp} составляет 0,07. Естественно предположить, что среднее значение k_i может служить критерием отнесения территории к районам с интенсивными и частыми градобитиями, т. е. к районам с неблагоприятными условиями для производства сельскохозяйственной продукции. Как видно из таблицы, региональный показатель градоопасности k_i Баксанского района более чем в 2 раза превышает среднее значение по республике. В то же время для наименее градоопасной территории Эльбрусского района это значение в 7 раз меньше, чем среднее по республике.

Для выяснения вопроса об интенсивности градовых осадков на рассматриваемой территории и оценки ущерба от градобитий приведен рис. 4. На нем представлен расчет распределения суммарной кинетической энергии града для рассмотренных градобитий.

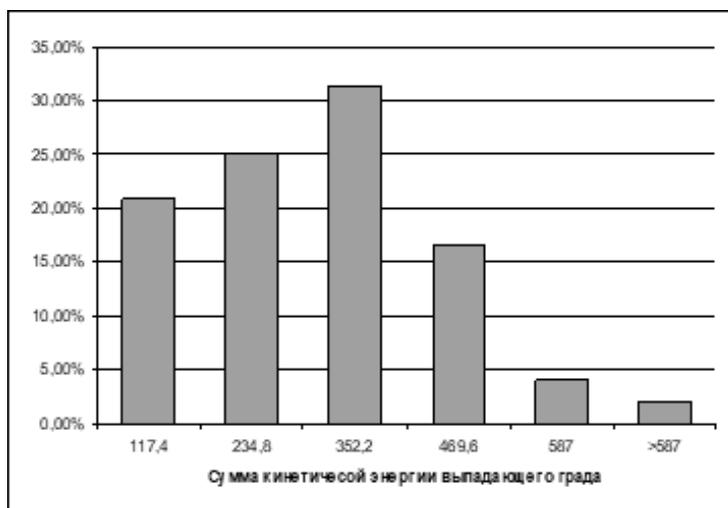


Рис. 4. Повторяемость суммарной кинетической энергии градобитий за период исследования.

Анализ рисунка с учетом (РД 52.37.902-2020, 2020) показывает, что во время градобитий у озимой пшеницы на отдельных участках в 55 % случаев ущерб может составить от 50 до 100 %.

Заключение

На основе многолетних радиолокационных наблюдений за градовыми процессами проведено районирование территории Кабардино-Балкарской республики по интенсивности и частоте градобития.

Исходя из задач районирования территории было получено представление о распределении мест выпадения града по территории республики в период с 2003 по 2022 гг. Статья отражает общую тенденцию выпадения градовых осадков — преимущественно в горной и предгорной зонах республики. При этом именно в предгорной зоне наблюдается максимум повторяемости выпадений града за указанный период. В степных районах республики (Прохладненском, Майском и Терском) выпадений града значительно меньше

Исследование показало, что максимум повторяемости выпадения града в указанный временной период приходился на территорию центральной части Баксанского района. Кроме того, были выявлены административные районы Кабардино-Балкарской республики, наиболее неблагоприятные для производства сельскохозяйственных растений. Ими оказались Баксанский, Зольский и Чегемский районы, причем в Зольском районе с 2003 по 2022 гг. зафиксировано 161, в Баксанском — 131, в Чегемском — 130 градобитий. Для сравнения в Майском районе было 13 случаев градобития.

Определена повторяемость суммарной кинетической энергии для градобитий за период исследования.

Впервые получена карта интегральной градоопасности района исследования за период с 2003 по 2022 годы. В работе вводится региональный показатель градоопасности k_i , который может быть использован в качестве критерия для оценки территорий с неблагоприятными условиями для производства сельскохозяйственной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев М. Т. (1968). Радиолокационные измерения макроструктурных характеристик облаков // Труды III Всесоюзного совещания по радиолокационной метеорологии. — М.: Гидрометеиздат. С. 96–107.

Абшаев М. Т., Бурцев И. И. и др. (1980). Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты — Л.: Гидрометеиздат. 231 с.

Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Баркова М. В., Малкарова А. М. (2014). Руководство по организации и проведению противоградовых работ. — Нальчик. Печатный двор. 508 с.

Березинский И. Н., Инюхин В. С., Куцев С. А. и др. (2017). Радиолокационные характеристики градовых облаков / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620749 от 10.07.2017.

Инюхин В. С., Атабиев М. Д. (2014). Ослабление радиоволн в смешанных градовых осадках / Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. 7–9 октября 2014 г. Ч. 2. С. 24–34. <http://dspace.gela.org.ge/handle/123456789/5269>.

Инюхин В. С., Куцев С. А., Сусницина Ю. В. (2017). Климатологические особенности выпадения града в двух регионах Центрального Кавказа на начало XXI века / Сборник научных трудов Высокогорного геофизического института. — Уфа. С. 4452.

Инюхин В. С. (2021). Двухволновые радиолокационные исследования градовых облаков / Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы — Нальчик. С. 151–156.

Инюхин В. С., Чередник Е. А. (2022а) Радиолокационные методы определения микроструктуры града // Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды. Доклады IV Международной научной конференции. — Ставрополь. С. 181–185.

Инюхин В. С. (2017). Методология повышения качества сбора и представления радиолокационных данных для определения микроструктуры града // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. С. 7–18.

Инюхин В. С., Лиев К. Б., Макитов В. С. (2019). Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения сантиметрового диапазона в градовых облаках / В сборнике: Распространение радиоволн. Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. С. 271–274.

Инюхин В. С., Чередник Е. А. (2022б). База микрофизических параметров градовых облаков сезона 2011 года. — Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620749 от 05.07.2022.

РД 52.37.902.2020 (2020) Порядок обследования и оценки степени повреждения сельскохозяйственных растений от градобитий. — Нальчик: ООО «Фрегат». 34 с.

Abshaev M. T., Inyukhin V. S., Tapaskhanov V. O. (1994). Computerized system for hail suppression / Sixth WMO Scientific conf. on Weather modif. — Italy. 1994. V. 1.

ГРАД В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

К. Б. Лиев, С. А. Куцев

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: buffy-li@mail.ru,
stasuk6@mail.ru

Поступила в редакцию 26.01.2023
Поступила после доработки 14.03.2023

Введение

Град образуется в теплое время года, когда сильна тепловая конвекция (восходящее движение воздуха) и развиваются мощные внутримассовые или фронтальные кучево-дождевые облака. В таких облаках над уровнем максимальной скорости восходящих воздушных потоков образуется зона повышенной влажности ($20\text{--}30\text{ г/м}^3$), в которой происходит накопление крупных капель. Вертикальная протяженность такой зоны может превышать 3 км. Если максимальная скорость восходящих потоков в облаке (выше уровня нулевой изотермы) более 10 м/с, а вершина облака имеет температуру $-20\text{...}-25\text{ }^\circ\text{C}$ и находится выше уровня кристаллизации, в облаке может образоваться град (Абшаев и др., 2014).

Крупные капли, поднятые восходящими потоками воздуха в верхнюю часть облака, замерзают и образуют зародыши градин, которые быстро растут при слиянии с другими переохлажденными каплями. Чем больше скорость восходящих потоков и чем дольше они действуют, тем крупнее становится град. Часть облака, где происходит основной рост града, называют градовым очагом.

Градобиения наносят огромный ущерб не только сельскому хозяйству. Например, 19 августа 2015 г. на Северном Кавказе общая площадь выпадения града составила более 10 тыс. км² (Абшаев и др., 2022). Град сопровождался ураганным ветром, ливневыми осадками, грозой, паводками и смерчами, под действием которых были разрушены линии электроснабжения, с корнем вырваны деревья, сорваны крыши домов, выбиты стекла, повреждены сотни автомобилей. В ряде районов и населенных пунктов был введен режим чрезвычайной ситуации. От града размером с куриное яйцо пострадали десятки людей, более 100 тысяч человек остались без электричества. Общая площадь поврежденных посевов и зеленых насаждений в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах Российской Федерации составила порядка 50 тыс. га, без учета площадей повреждений в частном секторе.

Зоны, наиболее подверженные градобиениям

Зоны наиболее опасных градобиений находятся в предгорных и горных районах Северного Кавказа и Закавказья, Среднеазиатских республик и Юго-Восточного Казахстана, где возникают особенно мощные восходящие потоки в летние жаркие дни за счет большой неравномерности в нагревании различных форм рельефа, а также за счет восхождения воздуха по склонам гор (Суспицына, 2021). Сильные градобиения бывают местами также в Крыму, в Молдавии, в Прикарпатье и Закарпатье. Самым градоопасным регионом Российской Федерации является Северный Кавказ.

Противоградовые работы в регионе осуществляются в рамках выполнения государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1950-р от 11.11.2010 г., подпрограмма «Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды», усилиями четырех противоградовых служб: Северо-Кавказской, Ставропольской, Краснодарской и недавно восстановленной Крымской.

Указанные службы обеспечивают комплексную защиту агропроизводства и населения от градобитий в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах методами активного воздействия, а также оперативно информируют органы государственной власти о возникновении опасных и стихийных явлений погоды.

В центральной части Северного Кавказа защиту от градобития осуществляет Северо-Кавказская военизированная служба. Защищаемая территория располагается вдоль Главного Кавказского хребта. В направлении с северо-востока на юго-запад защищаемая и прилегающая к ней территория представляет собой три «ступени»: первая — Кабардинская и Осетинская наклонные равнины с высотами 170–500 м над ур. м., пересеченные долинами рек, террасами и пологими балками; вторая — увалистые возвышенности, плато и невысокие отроги от 500 до 1000 м над ур. м. с множеством оврагов и лощин; третья — горы Балкарии с высотой от 1000 до 5000 м над ур. м. Градоопасность района меняется с высотой над уровнем моря. Наибольшее число случаев зарождения градовых облаков наблюдается на третьей «ступени», наименьшее — соответственно на первой. Карта зарождения градовых облаков за период 2003–2015 гг. приведена на рисунке 1.

Район противоградовых работ расположен в южной климатической зоне умеренных широт. Летом в регионе отмечается повышенная повторяемость западных вторжений по периферии отрога Азорского максимума. Атмосферная циркуляция в значительной степени формируется под воздействием местных факторов, обусловленных орографическими особенностями данного региона, к которым относятся частный орографический циклогенез в районе Теберды и Северной Осетии и выход южных циклонов со Средиземного моря. Повышенная градовая опасность защищаемой территории объясняется близостью Главного Кавказского хребта, задерживающего продвижение атмосферных фронтов и способствующего их окклюдированию.

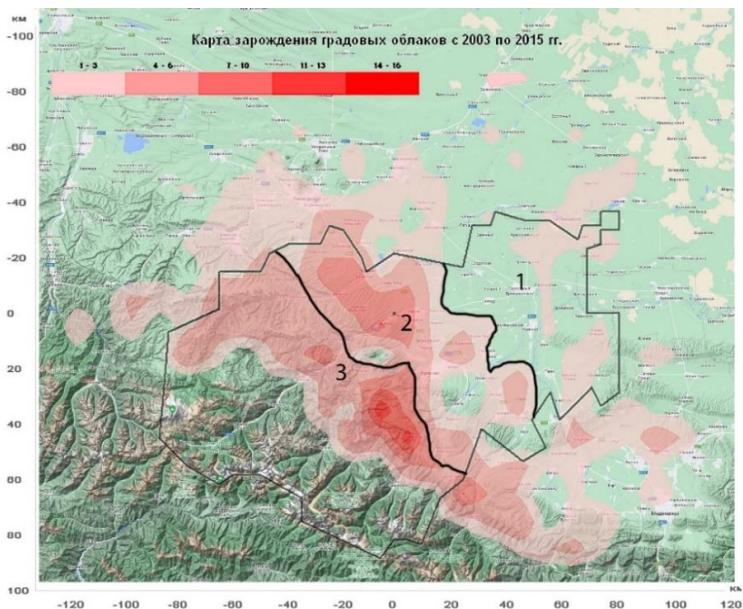


Рис. 1. Карта зарождения градовых облаков с 2003 по 2015 г.

Расположение района в сложных физико-географических условиях определяет пониженный температурный режим и повышенное увлажнение, способствующие активизации конвективных процессов в теплый период года. Наиболее высокие средние за сезон и абсолютные температуры воздуха (22 и 37 °С) наблюдаются в центральном районе. Наиболее увлажненным является северо-западный район, где скорость ветра может достигать 40 м/с. За противоградовый сезон отмечается в среднем до 90–100 дней с ливнями и грозами, которые зачастую сопровождаются выпадением крупы и града.

Характеристики градовых облаков Северного Кавказа

Данные о выпадении града в центральной части Северного Кавказа были получены на основе наблюдений метеорологического

двухволнового радиолокатора МРЛ-5, установленного на научно-исследовательском полигоне «Кызбурун» ФГБУ «ВГИ», за период с 2003 по 2022 г. (рис. 2).

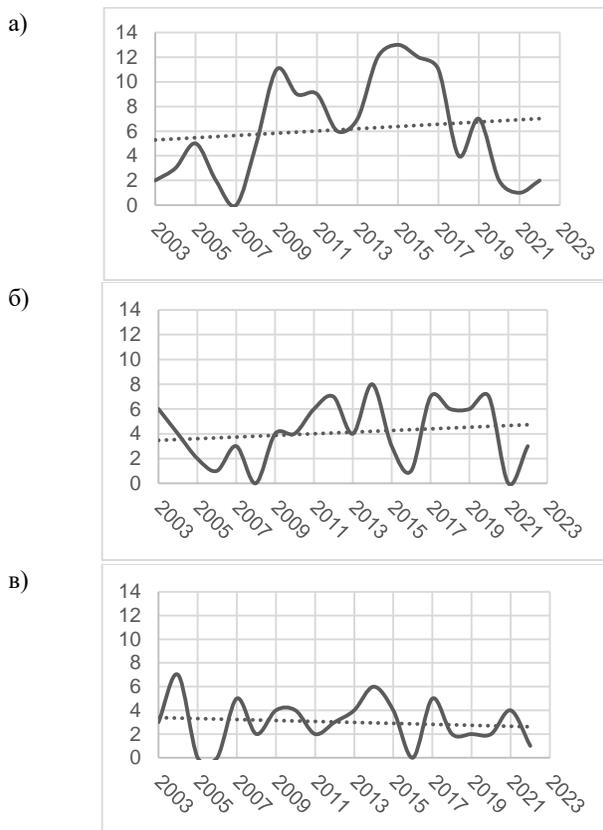


Рис. 2. Количество дней с градом за период с 2003 по 2022 г. в июне (а), июле (б) и августе (в)

Количество дней с градом уменьшается от июня к августу. Всего за рассмотренный период было отмечено 123 случая града в июне, 82 — в июле и 60 — в августе.

Самым градоопасным месяцем является июнь, в котором в среднем наблюдается 6 дней с выпадением града. В отдельные годы количество дней с градом в июне колеблется от 0 (2007 г.) до 13 (2015 г.). В июле и августе град отмечался не более 8 раз в месяц.

За 20-летний период в целом установить тенденцию изменения количества дней с градом не удалось.

Основными параметрами для прогноза перемещения градовых ячеек и определения периода воздействия является время возникновения первого радиоэха градового облака и время до его максимального развития (Инюхин и др., 2016).

Анализ 950 градовых облаков, зафиксированных на территории Северного Кавказа за период 2003–2023 гг., позволил определить время появления первого радиоэха и время максимального развития грозового облака.

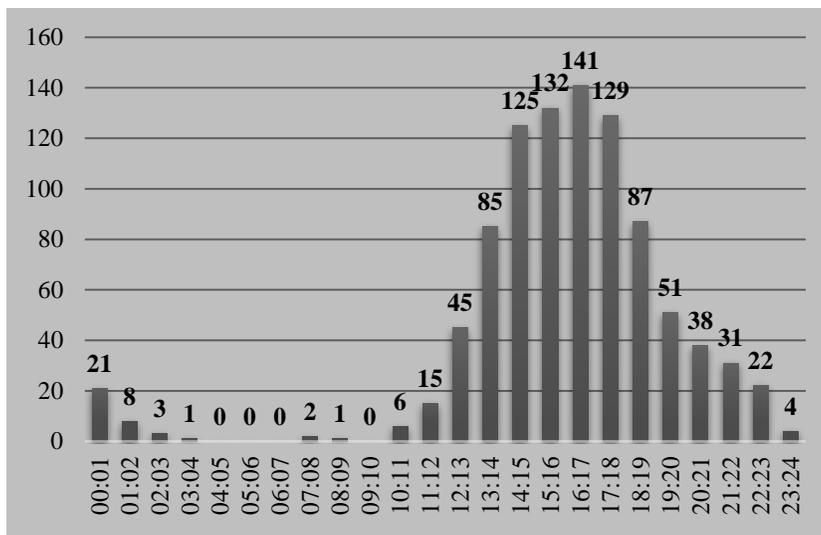


Рис. 3. Количество случаев зарождения градовых облаков в течение суток (по данным за 2003–2023 гг.)

На рисунке 3 представлена гистограмма количества случаев зарождения градовых облаков: по оси абсцисс отложено время суток (часовые интервалы), а по оси ординат — количество случаев появления первого радиоэха, зафиксированных в конкретный час дня за весь период наблюдений.

Установлено, что градовые облака на территории Северного Кавказа могут появляться с 10 до 23 ч, максимального развития процесс образования градовых ячеек достигает в период с 14 до 18 ч.

Аналогичная гистограмма была построена для суточного хода максимального развития градовых облаков, определяемого по времени наступления пика радиолокационной отражаемости (рис. 4).

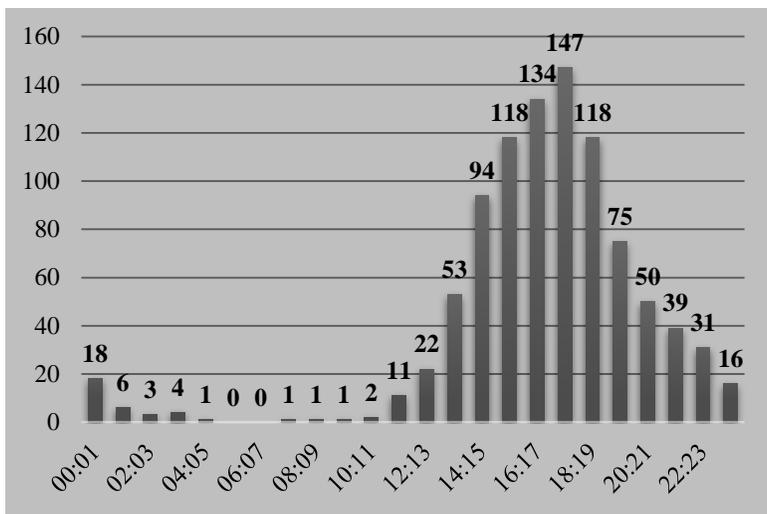


Рис. 4. Суточный ход количества градовых облаков, достигших максимального развития (по данным за 2003–2023 гг.)

Время, когда наибольшее количество градовых облаков достигает максимального развития (пика радиолокационной отражаемости), смещено на 1 ч относительно времени зарождения грозовых ячеек. На территории центральной части Северного Кавказа градовые облака

в состоянии максимального развития чаще всего наблюдаются в период с 15 до 19 ч. Промежуток времени от момента обнаружения в облаке первого радиоэха до его максимального развития в среднем с вероятностью более 70 % составляет 1 ч (рис. 5). Однако в реальных условиях время развития градового облака от зарождения до максимума отражаемости может составлять от 30 мин до нескольких часов. При этом известны случаи, когда от обнаружения первого радиоэха до появления града проходило не более 4 мин (Liev и др., 2021).

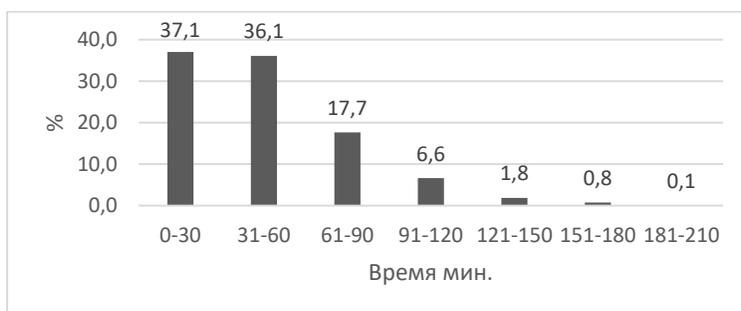


Рис. 5. Вероятность времени наступления стадии максимального развития градового облака (от момента появления первого радиоэха)

Заключение

На территории центральной части Северного Кавказа самым градоопасным месяцем является июнь. За период с 2003 по 2023 г. тенденции увеличения или уменьшения количества случаев града в целом за весь летний период и за отдельные месяцы не наблюдается. Градовые облака зарождаются преимущественно с 14 до 18 ч и своего максимального развития достигают в период с 15 до 19 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Баркова М. В., Малкарова А. М. (2014). Руководство по организации и проведению противорадовых работ. — Нальчик: Печатный двор.

Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Силькевич А. А. и др. (2022). Об особенностях развития суперячейкового конвективного облака в стадии максимальной грозовой активности (19 августа 2015 г., Северный Кавказ) // Метеорология и гидрология. № 4. С. 96–110.

Инюхин В. С., Лиев К. Б., Макитов В. С., Куцев С. А. (2016). Радиолокационные исследования распределения зон формирования первого радиоэха градовых облаков // Известия РАН. ФАО. Том 52. № 6. С. 1–8.

Суспицына Ю. В. (2021). Тенденция изменения количества осадков за месяц в летний период по годам в районе города Нальчик // Безопасность жизнедеятельности. № 8 (248). С. 51–56.

Liev K. B., Kushchev S. A., Inuhin V. S. (2021). Movements of hail cells on the territory of the Kabardino-Balkarian Republic in 2017 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 840 (1), 012027.

ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН ОТ СТОЛБЧАТЫХ ОБЛАЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ

М. Ч. Залиханов, Л. Т. Созаева

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: ljk_62@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023

Поступила после доработки 20.10.2023

Введение

Облака и осадки представляют собой сложную систему, содержащую множество гидрометеоров, выпадающих или взвешенных в атмосфере. Для получения информации об их микроструктурных характеристиках (о фазовом состоянии, форме, размере, водности и ледности) применяются дистанционные методы.

Появление радиолокаторов (ДМРЛ-С) потребовало разработки новых методов радиолокационных исследований, позволяющих правильно интерпретировать характеристики сигнала, принятого на ортогональных поляризациях. При этом представляет интерес создание таких алгоритмов, которые дают возможность рассчитать поляризационные характеристики обратного рассеяния радиоволн от гидрометеоров несферической формы.

Известны несколько моделей несферических частиц — конечные и бесконечные цилиндры, эллипсоиды и сфероиды, чебышевские и другие частицы. Для их описания наиболее часто используется сфероидальная модель, основным параметром которой является

фактор формы, равный отношению максимальной полуоси к минимальной (Гегузин, 1977). Варьируя его, можно аппроксимировать форму частиц в широких пределах: от сфер до удлинённых игл (вытянутые сфероиды) и пластинок (сплюснутые сфероиды). Ещё одним достоинством сфероидальной модели является то, что решение задачи рассеяния при стремлении фактора формы к единице сводится к хорошо известному решению Ми для сферических частиц.

Разнообразие форм гидрометеоров стимулирует применение современных методов для расчетов рассеивающих свойств несферических частиц (Mischhenko et al., 2002; Voshchinnikov, Farafonov, 1993). Особого внимания заслуживает метод разделения переменных для несферических частиц SVM (Separation of Variables Method), обладающий высокой точностью (Voshchinnikov, Farafonov, 1993). Этот метод был успешно применен для расчета характеристик рассеяния радиоволн от облачных капель (Созаева, Макитов, 2019; Созаева, Жабоева, 2020) и удлинённых облачных кристаллов (Созаева, 2022).

Что касается облачных кристаллов, то все их многообразие можно свести к трем основным типам: столбчатые (удлинённые иглы и столбики), пластинчатые кристаллы (толстые и тонкие) и пульки (Auer, Veal, 1970; Oguchi, 1983; Um et al., 2015).

Сфероидальная модель адекватно описывает поляризационные характеристики обратного рассеяния большинства атмосферных гидрометеоров, включая облачные ледяные кристаллы, снежинки и капли (Bringi, Chandrasekar, 2001; Matrosov et al., 2001).

В настоящей статье детально исследуется возможность применения метода SVM для расчета характеристик обратного рассеяния от столбчатых кристаллов при их аппроксимации вытянутыми сфероидами (Фарафонов и др., 2019). Параметры столбчатых кристаллов были заимствованы из обзорной публикации о факторе формы реальных облачных кристаллов (Um et al., 2015).

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать схему расчета характеристик рассеяния ледяных столбчатых кристаллов;
- исследовать предельный случай метода SVM: отношение высоты ледяного столбчатого кристалла к его толщине стремиться к единице;
- провести расчеты сечений обратного рассеяния ледяных столбчатых кристаллов на рабочей длине волны радиолокатора с двойной поляризацией ДМРЛ-С (5,3 см).

Материалы и методы исследования

Температура, давление, влажность, наряду с ядрами кристаллизации, в конвективных облаках определяют разнообразие форм ледяных кристаллов.

В ходе международных экспериментов в тропиках, Арктике и средних широтах были получены с высоким разрешением изображения кристаллов, зарегистрированные с помощью устройства для формирования изображения облачных частиц в широком диапазоне температур от минус 87 до 0 °С, позволившие измерить параметры (максимальный размер, длина, ширина и отношение большой оси к малой) кристаллов в зависимости от температуры. Также были проанализированы материалы из более, чем 80-ти публикаций, в которых имеются сведения о параметрах реальных кристаллов. В результате была создана единая база данных параметров кристаллов (Um et al., 2015).

Там же было представлено универсальное соотношение, связывающее диаметр D ледяного столбика с его высотой L :

$$D = 1,14 L^{0,892}, \quad (1)$$

где высота цилиндра варьируется в пределах $10 < L < 1000 \text{ мкм}$, а фактор формы принимает значения $L/D \leq 2$.

Сфероидальная модель применяется к цилиндрическим частицам следующим образом: исходная частица (столбчатый кристалл высотой L и диаметром D) заменяется эффективным вытянутым сфероидом. При этом предполагается, что объемы модельного сфероида и столбчатого кристалла совпадают, совпадают также и отношения максимальной к минимальной оси сфероида и высоты цилиндра к его диаметру (Фарафонов и др., 2019):

$$V_{spheroid} = V_{cyl}, \quad \frac{a}{b} = \frac{L}{D},$$

где $V_{spheroid}$ — объем сфероида,

V_{cyl} — объем равновеликого цилиндра;

a — большая полуось сфероида;

b — малая полуось сфероида;

L — высота цилиндра;

D — ширина цилиндра.

Для цилиндров значения полуосей равновеликого вытянутого сфероида равны:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{16}} D = 0,572357D, \quad b = \sqrt[3]{\frac{3}{16}} L = 0,572357L.$$

Для вытянутой сфероидальной частицы эквивалентный радиус (радиус сферы, объем которой равен объему сфероида) вычисляется по формуле:

$$r_v = ab^2.$$

Для решения задачи рассеяния радиоволн столбчатыми кристаллами был использован метод разделения переменных SVM. Отличительной особенностью этого метода является применение

сфероидального базиса, повысившего точность метода и позволившего его использовать для удлиненных частиц.

Согласно методу, электромагнитная волна падает под углом α к оси вращения модельного сфероида, которая может быть представлена в виде суперпозиции волн двух типов: ТЕ- и ТМ-mode. В случае ТЕ-mode падающее электрическое поле поляризовано перпендикулярно, а в случае ТМ-mode — параллельно оси сфероида. Сфероидальная система координат (ξ, η, φ) вводится таким образом, что начало координат совпадает с центром сфероида. Тогда выражения для поперечных сечений обратного рассеяния имеют вид (Farafonov, 1993):

$$\begin{aligned} \text{TE - mode:} \quad \sigma_{bsk}^{TE} &= \frac{4\pi}{x_v^2} \left| \sum_{l=1}^{\infty} i^l a_l^{(1)} S_{ll}(c, \cos\alpha) - \right. \\ &\quad \left. \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} i^{(l-1)} (k_1 a_{ml}^{(1)} S_{ml}(c, \cos\alpha) - i b_{ml}^{(1)} \frac{dS_{ll}(c, \cos\alpha)}{d \cos\alpha}) \sin\alpha \right|^2 \\ \text{TM - mode:} \quad \sigma_{bsk}^{TM} &= \frac{4\pi}{x_v^2} \left| \sum_{l=1}^{\infty} i^l b_l^{(1)} S_{ll}(c, \cos\alpha) - \right. \\ &\quad \left. \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} i^{(l-1)} (k_1 b_{ml}^{(1)} S_{ml}(c, \cos\alpha) - i a_{ml}^{(1)} \frac{dS_{ll}(c, \cos\alpha)}{d \cos\alpha}) \sin\alpha \right|^2 \quad (2) \\ b_l^{(1)} &= -2 i^l \frac{\left[(\xi_0^2 - 1)^{1/2} R_{ll}^{(1)}(c, \xi_0) \right]}{\left[(\xi_0^2 - 1)^{1/2} R_{ll}^{(3)}(c, \xi_0) \right]} N_{ll}^{-2}(c) S_{ll}(c, \cos\alpha), \\ \xi_0 &= \left(\frac{a}{b} \right) \left[\left(\frac{a}{b} \right) - 1 \right]^{-1/2}, \end{aligned}$$

где k_1 — волновое число в вакууме; c — безразмерный параметр; λ — длина электромагнитной волны; $S_{mi}(c_i, \eta)$ — вытянутые угловые сфероидальные функции, $R_{mi}^{(1),(3)}(c_i, \xi)$ — вытянутые радиальные сфероидальные функции первого и третьего порядка, $N_{mi}(c_i)$ — нормировочный множитель; $x_v = 2\pi r_v / \lambda$ — безразмерный дифракционный параметр.

Для вычисления сечений обратного рассеяния радиоволн сферическими кристаллами применяются точные формулы Ми, имеющие вид (Bohren, Huffman, 1983):

$$\sigma(m, r, \lambda) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1)(a_n - b_n) \right|^2 \quad (3)$$

где r — радиус сферической частицы;

λ — длина электромагнитной волны;

a_n и b_n — коэффициенты Ми, зависящие от комплексного показателя преломления частицы m и длины волны λ .

В области малых ледяных частиц (приближение Релея) формула (3) допускает упрощение:

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 (2r)^6 = 0,19 \frac{\pi^5}{\lambda^4} (2r)^6. \quad (4)$$

Для удобства радиолокационные свойства частиц описываются с помощью факторов обратного рассеяния Q , равных отношению сечений рассеяния к площади сферы в случае сферических или к площади равновеликой сферы в случае несферических частиц.

Температурная зависимость показателя преломления незначительна, что позволяет использовать показатель преломления

для ледяных кристаллов равный $m = 1,78 + 0,0024i$ для рассматриваемой длины волны.

Результаты расчетов и их обсуждение

Правомерность использования алгоритма SVM для реальных столбчатых кристаллов была проверена на предельном случае, когда максимальная и минимальная полуоси выравниваются и приближаются к радиусу эквивалентной сферы, т. е. $a/b \rightarrow 1$. Расчеты проводились для двух вариантов: направление распространения падающей плоской волны параллельно ($\alpha = 0^\circ$), т. е. $Q_{TM} = Q_{TE}$ и перпендикулярно ($\alpha = 90^\circ$) оси вращения модельного сфероида, т. е. — $Q_{TM} \neq Q_{TE}$.

Исследования показали, что для обоих вариантов значения факторов обратного рассеяния приближаются к аналогичным значениям эквивалентных сферических кристаллов (таблица 1).

Таблица 1

Факторы обратного рассеяния сферических и сфероидальных кристаллов при $a/b \rightarrow 1$

D , МКМ	L , МКМ	r_v , ММ	Q_{sph}	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	
				$Q_{TM} = Q_{TE}$	Q_{TM}	Q_{TE}
9	10	0,0053	1,0974E-13	1,0974E-13	1,0974E-13	1,0974E-13
69	100	0,0448	5,6022E-10	5,6021E-10	5,6022E-10	5,6022E-10
129	200	0,0853	7,3626E-09	7,3626E-09	7,3627E-09	7,3627E-09
185	300	0,1243	3,3198E-08	3,3198E-08	3,3198E-08	3,3199E-08
...
868	1700	0,6215	2,0721E-05	2,0720E-05	2,0721E-05	2,0741E-05
913	1800	0,6554	2,5621E-05	2,5621E-05	2,5621E-05	2,5649E-05
958	1900	0,6891	3,1306E-05	3,1306E-05	3,1306E-05	3,1344E-05
1003	2000	0,7227	3,7866E-05	3,7866E-05	3,7867E-05	3,7918E-05

При параллельном падении электромагнитной волны факторы обратного рассеяния совпадают с точностью 17–9 знаков после запятой для исследуемого диапазона размеров $0,0055 < r_v < 0,7227$ мм. При перпендикулярном падении значения факторы обратного рассеяния сферических кристаллов и сфероидальных для ТМ-mode совпадают с такой же точностью, а для ТЕ-mode — с точностью 17–6 знаков после запятой.

Эти результаты свидетельствуют о возможности применения метода SVM для расчета характеристик рассеяния для столбчатых облачных кристаллов.

Далее были проведены численные расчеты для столбчатых кристаллов и, для сравнения, для эквивалентных сферических кристаллов (рисунок 1).

Факторы обратного рассеяния сферических и столбчатых кристаллов представлены на рисунке 1а, в. На рисунке 1б, г отображены кривые относительных ошибок расчета факторов обратного рассеяния сферических кристаллов по отношению к сфероидальным.

Относительные ошибки значений факторов обратного рассеяния сферических кристаллов по отношению к сфероидальным, рассчитанным по формуле (2), равны:

$$\delta = \left| Q_{sph} / Q_{SVM} - 1 \right|, \quad (5)$$

где Q_{SVM} — факторы обратного рассеяния для столбчатых кристаллов по SVM; Q_{sph} — факторы обратного рассеяния для сферических кристаллов.

Расчеты проводились, также как в предельном случае $a/b \rightarrow 1$, для двух вариантов: направление распространения падающей плоской волны параллельно ($\alpha = 0^\circ$) и перпендикулярно ($\alpha = 90^\circ$) оси вращения модельного сфероида.

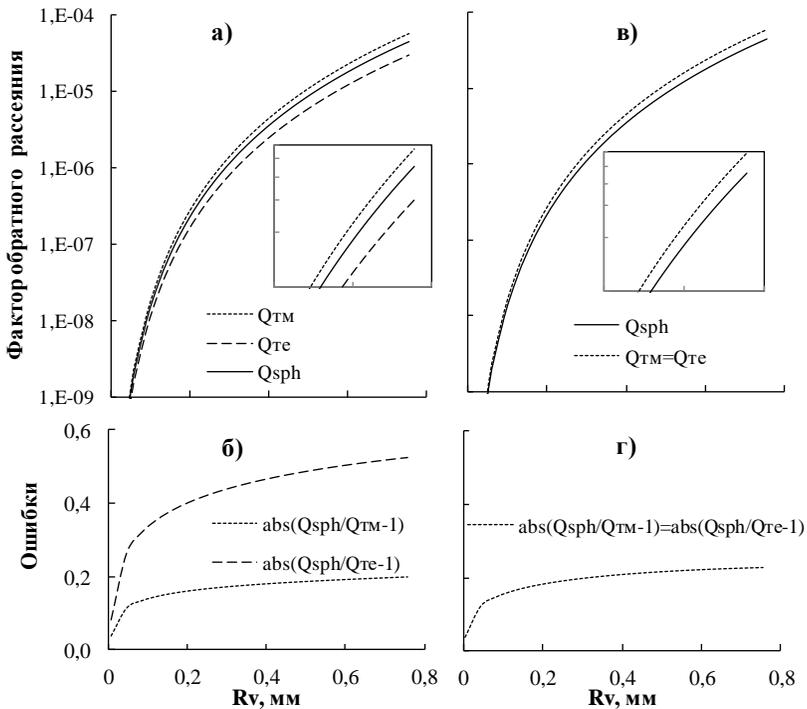


Рис. 1. Факторы обратного рассеяния столбчатых кристаллов в зависимости от эквивалентного радиуса при перпендикулярном (а) и параллельном (б) падении электромагнитной волны к оси вращения сфероида; (в), (г) ошибки расчетов по формуле (5)

Исследования показали, что формы ледяных кристаллов влияют на поляризационные характеристики обратного рассеяния.

При $\alpha = 0^\circ$ относительные ошибки значений факторов обратного рассеяния для сферических кристаллов Q_{sph} по отношению к факторам обратного рассеяния Q_{TM} и Q_{TE} совпадают и почти для

всех размеров равны 20 % за исключением кристаллов с $r_v < 0,03$ мм, для которых ошибки составляют до 10 %.

При $\alpha = 90^\circ$ обратное рассеяние для TE-mode и для TM-mode расходятся в обе стороны от кривой для сферических кристаллов, причем это расхождение тем больше, чем больше размер кристаллов. Относительные ошибки расчетов факторов обратного рассеяния для сферических кристаллов по отношению к факторам обратного рассеяния сфероидальных кристаллов для TE-mode не превышают 20 %, для TM-mode доходят до 55 %. Для кристаллов с $r_v < 0,01$ мм ошибки составляют менее 10 %.

Заключение

Исследования характеристик рассеяния электромагнитного излучения от столбчатых облачных кристаллов по различным алгоритмам показали, что поляризованные характеристики рассеяния, рассчитанные методом разделения переменных SVM с $a/b \leq 2$ значительно отличаются от обратного рассеяния для сферических кристаллов. При этом относительная ошибка составляет 20 %, что делает необходимым применение предлагаемого метода для расчета сечений обратного рассеяния поляризованных волн от столбчатых облачных кристаллов.

Полученные результаты могут быть полезны для решения обратных задач при дистанционном зондировании облаков и осадков с помощью радиолокатора с двойной поляризацией ДМРЛ-С, а также при математическом моделировании градовых облаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гегузин Я. Е.* (1977). Капля. — М.: Наука. 175 с.
- Созаева Л. Т., Макитов В. С.* (2019). Влияние деформации растущих в электромагнитном поле капель на их рассеивающие свойства. // Наука. Инновации. Технологии. № 3. С. 98–106.

Созаева Л. Т., Жабоева М. М. (2020). Обратное рассеяние радиолокационного излучения облачными и дождевыми каплями. // Труды ГГО. № 599. С. 140–151.

Созаева Л. Т. (2022). О возможности применения сфероидальной модели частиц для расчета характеристик рассеяния радиоволн от удлинённых облачных кристаллов. // Труды ГГО. № 606. С. 133–144.

Фарафонов В. Г., Ильин В. Б., Прокопьева М. С., Тулегенов А. Р., Устимов В. И. (2019). О сфероидальной модели рассеяния света несферическими частицами. // Оптика и спектроскопия. Том. 126. Вып. 4. С. 443–449.

Auer A. H., Veal D. L. (1970). The dimension of ice crystals in natural clouds. // J. Atmos. Sci. 27. P. 919–926.

Bohren C., Huffman D. (1983). Absorption and Scattering of Light by Small Particles. // New York: John Wiley & Sons, 660 p.

Bringi V. N., Chandrasekar V. (2001). Polarimetric Doppler Radar. // Cambridge Univ. Press, New York. 636 p.

Farafonov V. G. (1993). Application of non-orthogonal bases in the theory of light scattering by spheroidal particles. // Light Scattering Reviews. Springer-Praxis. 8. P. 189–268.

Matrosov S. Y., Reinking R. F., Kropfli R. A., Martner B. E., Bartram B. W. (2001). On the use of radar depolarization ratios for estimating shapes of ice hydrometeors in winter clouds. // J. Appl. Meteorol., 40, P. 479–490.

Mishchenko M. I., Travis L. D., Lacis A. A. (2002). Scattering, absorption and emission of light by small particles. // Cambridge: Cambridge Univ. Press. 445 p.

Voshchinnikov N. V., Farafonov V. G. (1993). Optical properties of spheroidal particles. // Astrophysics and Space Science. 204(10). P. 19–86.

Oguchi T. (1983). Propagation and scattering of electromagnetic waves in rain and other hydrometeors. // Proc. IEEE. 71(9). P. 1029–1078.

Um J., McFarquhar G. M., Hong Y. P., Lee S. S., Jung C. H., Lawson R. P., Mo. Q. (2015). Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // Atmos. Chem. Phys. V. 15, № 7. P. 3933–3956. DOI: 10.5194/acp-15-3933-2015.

УДК 551.594

ВЛИЯНИЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РАЙОНЕ КАРЬЕРА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК

Р. Х. Зекореев

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: zeri54@mail.ru

Поступила в редакцию 27.07.2023
Поступила после доработки 7.09.2023

Введение

Исследования, проведенные в различных физико-географических районах, показывают, что выбросы промышленных предприятий, открытых горных разработок, автотранспорта способны изменить электрические свойства приземного слоя атмосферы. Это подтверждают наблюдения за напряженностью электрического поля, проведенные вблизи источников антропогенного загрязнения.

Электрическое поле атмосферы в приземном слое в условиях «хорошей погоды» (при облачности не более 3 баллов, отсутствии осадков) принимается однородным. В такие дни напряженность поля у поверхности земли максимальна, составляет в среднем 120–130 В/м и убывает с высотой. Суточный ход напряженности поля в этих условиях, получивший название «унитарная вариация», идентичен на всех станциях.

На фоне суточного хода напряженность поля даже в условиях «хорошей погоды» испытывает довольно значительные нерегулярные колебания, связанные с появлением в приземном слое атмосферы заряженных областей, образование которых происходит за счет

электризации атмосферного воздуха и аэрозоля. К основным процессам, формирующим электрическое поле в нижней атмосфере, следует отнести электризацию, связанную с захватом частицами аэроионов, и электризацию, связанную с обменом зарядами между частицами, который возникает либо после разрыва контакта между ними, либо после их разрушения (Имянитов и др., 1971).

Электризация, связанная с захватом частицами аэроионов, теоретически подробно исследована Ю. С. Седуновым (1959). Им были получены выражения, справедливость которых проверялась в лабораторных условиях и подтвердилась для частиц микронных размеров. Применение теории случайных блужданий к задаче о накоплении заряда на частицах позволило расширить дисперсию в распределении зарядов на частицах и ликвидировать трудности объяснения наблюдаемых больших зарядов на частицах (Левин, 1961). Однако исследования в этой области показали, что величины зарядов на частицах невозможно объяснить только электризацией за счет захвата аэроионов и что наряду с этим механизмом в приземном слое атмосферы идет процесс электризации, связанный с обменом зарядами между частицами при нарушении контакта между ними или их разрушении. Это подтверждают исследования, проведенные в тропических областях во время пыльных бурь, которые выявили зависимость напряженности электрического поля от химической природы пыли (Rudg, 1914). Данный эффект возникает вследствие разделения в пространстве, с одной стороны, крупных частиц пыли, заряженных одним знаком, с другой — мелких частиц пыли или воздуха, заряженных другим знаком. Так, кислотная пыль способствует образованию отрицательных значений напряженности поля, а щелочная — положительных.

Разработанные математические модели различных типов дают представление о закономерностях протекания электрических процессов в приземном слое атмосферы. Например, в модели (Hoppel, Gathman, 1971) был рассмотрен случай турбулентного электродного эффекта при наличии аэрозольных частиц в атмосфере, что существенно сокращает несоответствие теории и эксперимента.

В выводах численной модели для нестационарного турбулентного приземного слоя при наличии аэрозольных частиц в атмосфере отмечается, что концентрация аэрозольных частиц более $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ оказывает существенное влияние на распределение электрических характеристик у подстилающей поверхности (Редин и др., 2010).

Целью настоящей работы является изучение влияния аэрозольного загрязнения на напряженность электрического поля на основе натуральных наблюдений в районе Мукуланского карьера.

Материалы и методы исследования

Существует достаточное количество измерений параметров атмосферного электричества в приземном слое воздуха в разных физико-географических районах. В частности, по данным круглосуточной регистрации напряженности электрического поля на станции Терскол (высота 2200 м) летом в ясную погоду установлено, что напряженность поля составляет в среднем 30 В/м (Пудовкина, 1961).

Исследования, проведенные в Восточной Сибири, показывают, что наибольшие значения напряженности поля наблюдаются на карьере открытых разработок мрамора Слюдянка, где загрязненность воздуха аэрозольными частицами весьма велика (Филиппов и др., 1984).

В результате изучения влияния загрязнения воздушного бассейна в Ростове-на-Дону на параметры электрического состояния атмосферы было выявлено уменьшение полярных электропроводностей и увеличение напряженности электрического поля в условиях повышенного содержания в атмосфере аэрозольных частиц (Петров и др., 2010).

Результаты измерений параметров атмосферного электричества, проводившиеся на пике Чегет (высота 3040 м), показали, что суточный ход напряженности поля хорошо коррелирует с унитарной вариацией атмосферного потенциала за исключением тех случаев, когда ветер наблюдался северного или северо-восточного направления, где на расстоянии около 40 км расположен промышленный объект (Аджиев и др., 1990).

В рамках договора с Тырнаузским вольфрамо-молибденовым комбинатом специалистами ВГИ на Мукуланском карьере были организованы наблюдения за атмосферно-электрическими параметрами (напряженностью электрического поля). Пункт наблюдения находился в непосредственной близости от места открытых разработок вольфрамо-молибденовых руд на территории КРП-2 (комплексная ремонтная площадка, высота 2542 м), где проводилось дробление и разрушение горных пород, сопровождавшееся пылеобразованием.

Вертикальная составляющая напряженности поля E измерялась электростатическим флюксметром ротационного типа системы ГГО (Зекореев и др., 2010), который размещался на ровной горизонтальной площадке размером 5×5 м так, чтобы измерительная пластина флюксметра находилась на одном уровне с выбранной площадкой. Перед каждым измерением проводилась градуировка флюксметра и регистрирующего самопишущего прибора НЗ38-6П. За состоянием атмосферы в районе карьера ежедневно проводился визуальный контроль.

Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа отбирались дни с условиями «хорошей погоды» без осадков, гроз и туманов и облачностью не более 3 баллов, в которые суточный ход напряженности электрического поля должен соответствовать унитарной вариации. В июле 1990 г. таких дней в районе Мукуланского карьера было мало.

По данным наблюдений было получено, что напряженность электрического поля (E) 25 и 26 июля 1990 г. изменялась в пределах 500–1000 В/м и в среднем составила 750 В/м (рис. 1), что на порядок выше значений, характерных для чистой атмосферы в условиях «хорошей погоды» на высотах порядка 3000 м над уровнем моря.

Повышение напряженности поля в районе Мукуланского карьера связано, вероятно, с электризацией, происходящей под влиянием интенсивного образования аэрозольных частиц пыли при разработке горных пород. В результате при механическом разрушении

и электризации частиц горных пород у подстилающей поверхности образуется избыточный объемный заряд.

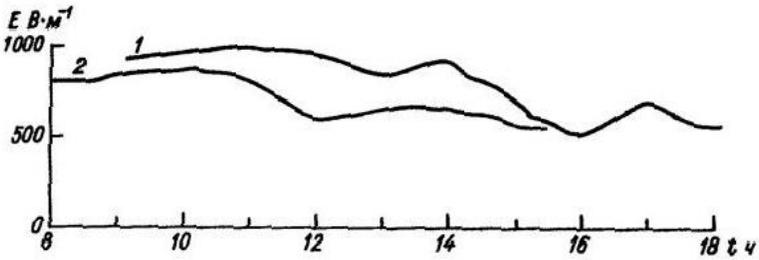


Рис. 1 Ход средних часовых значений напряженности электрического поля в районе Мукуланского карьера: 1 – 25 июля 1990 г., 2 – 26 июля 1990 г.

Одновременно с селективной зарядкой аэрозольных частиц пыли, зависящей от их размера, происходит захват легких аэроионов воздуха частицами пыли, что приводит к уменьшению электропроводности воздуха и росту напряженности электрического поля в районе карьера. Аэрозольные частицы в районе действующего карьера поступают в атмосферу непрерывно. Размер частиц колеблется от 0,1 до 10 мкм. Время жизни частиц, образующиеся в результате механического разрушения горных пород, определяется их размером: мелкие частицы диаметром 0,1 мкм, оседают со скоростью $8,97 \cdot 10^{-5}$ см/с и могут находиться в атмосфере во взвешенном состоянии в течение нескольких суток, частицы диаметром 10 мкм оседают со скоростью $3,03 \cdot 10^{-1}$ см/с и выпадают на землю за счет седиментации, согласно данным из таблицы (Райст, 1987).

Известно, что плотность вертикального тока проводимости $j = E \cdot \lambda$ в условиях «хорошей погоды» мало отличается от среднего значения (Имянитов и др., 1965). Изменение удельной проводимости λ при неизменном значении плотности тока j должно вызвать изменение напряженности электрического поля E , зависящего в этом случае от концентрации аэрозольных частиц Z . Аналитически зависимость между напряженностью электрического поля E и концентрацией аэрозольных частиц Z определяется соотношением:

$$E = \frac{2\pi D d j}{e w I} Z \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; d — средний диаметр аэрозольных частиц, м ; e — элементарный заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$; w — средняя подвижность легких ионов, $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; I — интенсивность ионообразования, $\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$; j — плотность тока проводимости, $\text{А}/\text{м}^2$; Z — концентрация аэрозольных частиц, м^{-3} .

По данному соотношению можно оценить концентрацию аэрозольных частиц, полагая, что хотя распределение частиц фоновое стратосферного аэрозоля по размерам и концентрация частиц может изменяться в широких пределах, но наиболее характерным является одномодовое распределение с модальным диаметром, близким к $d = 0,2 \text{ мкм}$ (Александров и др., 1992). Вычислим концентрацию аэрозольных частиц Z , используя следующие значения параметров, входящих в формулу (1):

Параметр	Значение	Источник информации
коэффициент диффузии D	$3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$,	Имянитов, Чубарина, 1965
интенсивность ионообразования I	$10^7 \text{ м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$	Имянитов, Чубарина, 1965
средняя подвижность легких ионов w	$5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	Таммет и др., 1988
плотность тока проводимости j	$7 \cdot 10^{-12} \text{ А}/\text{м}^2$	по данным измерений Аджиев и др., 2005
средняя напряженность электрического поля E	$750 \text{ В}/\text{м}$	данные измерений на Мукуланском карьере

Расчетная концентрация аэрозольных частиц Z при указанных значениях параметрах составляет $2,27 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ и может колебаться в пределах от $1,5 \cdot 10^9$ до $3 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ для диапазона измерений напряженности электрического поля $500\text{--}1000 \text{ В}/\text{м}$.

Резкое изменение напряженности поля 25 июля (рис. 2) вероятно вызвано влиянием отрицательного объемного заряда,

сосредоточенного в визуально наблюдавшемся плотном пылевом облаке, поднявшемся над измерительной площадкой на 5–6 м на расстоянии около 15 м и осевшем в течение 8 мин. Это облако вероятно состояло из крупных аэрозольных частиц, оседавших со скоростью около 3 см/с. По оценке П. Райста (1987), диаметр таких частиц в этом случае должен составлять около 30 мкм.

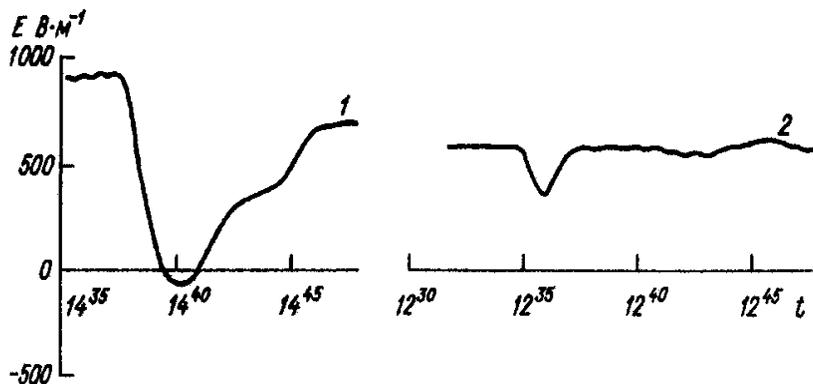


Рис. 2 Фрагмент записи изменения напряженности электрического поля при появлении пылевого облака в районе измерительной площадки на Мукуланском карьере 25 и 26 июля 1990 г. (кривые 1 и 2, соответственно)

26 июля 1990 г. аналогичный эффект проявился слабее, поскольку облако пыли находилось в стороне от измерительной площадки непосредственно над подстилающей поверхностью (рис. 2).

Это подтверждает тезис о селективной зарядке аэрозольных частиц в зависимости от их размеров: крупные аэрозольные частицы заряжаются отрицательным знаком и быстро оседают на земную поверхность, а более мелкие сутками остаются во взвешенном состоянии в воздухе и заряжены положительным знаком, образуя избыточный положительный объемный заряд в приземном слое атмосферы в районе Мукуланского карьера, формируя при этом повышенные значения напряженности электрического поля.

Заключение

Полученные результаты показывают, что напряженность электрического поля в окрестностях карьеров открытых горных разработок может на порядок превышать ее значения, характерные для чистой атмосферы в условиях «хорошей погоды». Рост напряженности электрического поля в ясные дни происходит под влиянием интенсивного образования аэрозольных частиц пыли.

Расчеты показали, что концентрация аэрозольных частиц в районе карьеров может колебаться в пределах от $1,5 \cdot 10^9$ до $3 \cdot 10^9$ м⁻³ при изменении напряженности электрического поля 500–1000 В/м.

Результаты измерений напряженности электрического поля вблизи карьеров открытых горных разработок могут использоваться в качестве индикатора аэрозольного загрязнения в приземном слое атмосферы для оперативного контроля состояния атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аджиев А. Х., Вакалов И. А., Куновых Г. В., Мартынов А. А., Шварц Я. М. (1990). Наблюдения за атмосферным электричеством на высокогорном пункте пик Чегет / Тезисы докладов 4-го Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Нальчик. 380 с.

Аджиев А. Х., Куновых Г. В., Болдырев А. С., Литвинова И. С., Марченко А. Г. (2005). Электрическое состояние атмосферы в районе Эльбруса / Труды Всероссийской конференции по селям, 26–28 октября 2005, Нальчик. С. 161–166.

Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. (1992). Озонный щит Земли и его изменения. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-ecology.info/term/27398/>

Зекорев Р. Х., Камбиев М. М., Машуков Х. Х. (2010). Некоторые результаты исследования параметров атмосферного электричества в районе Мукуланского карьера (Северный Кавказ) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Вып. 3. С. 43–46.

Имянитов И. М., Чубарина Е. В. (1965). Электричество свободной атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 240 с.

Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. (1971). Электричество облаков. — Л.: Гидрометеиздат. 93 с.

Левин Л.М. (1961) Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. АН СССР, М.

Петров А. И., Петрова Г. Г., Панчишкин И. Н., Кудринская Т. В., Петров Н. А. (2010). Результаты многолетних экспедиционных атмосферно-электрических исследований в приземном слое // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Спецвыпуск. С. 73–76.

Пудовкина И. Б. (1961). Некоторые результаты изучения аномалий электрического поля атмосферы в районе Баксанского ущелья // Труды Эльбрусской экспедиции. № 215.

Райст П. (1987). Аэрозоли. — М.: Мир, 278 с.

Редин А. А., Клово А. Г., Куповых Г. В., Морозов В. Н. (2010). Генерация объемного заряда вблизи поверхности земли с учетом взаимодействия аэрозольных частиц с аэроионами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Спецвыпуск. С. 81–85.

Седунов Ю. С. (1959). К теории диффузионного заряжения частиц произвольной формы // Инженерно-физический журнал. № 12. С. 57–63.

Таммет Х. Ф., Сальм Я. Й., Ихер Х. Р., Тамм Э. И., Мирме А. А., Кикас Ю. Э. (1988). Спектр подвижности аэроионов в приземном воздухе / Труды 3-го Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. — Л.: Гидрометеиздат. 288 с.

Филиппов А. Х., Кречетов А. А., Зарифова Н. Г. (1984). Результаты исследования атмосферного электричества в Восточной Сибири / Труды 2-го Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. — Л.: Гидрометеиздат. 279 с.

Hoppel W. A., Gathman S. G. (1971). Determination of the eddy diffusion coefficients from atmospheric electrical measurements // J. Geoph. Res. V. 76, № 6. P. 1467–1477.

Rudg W. A. D. (1914). On some sources of disturbance of the normal atmospheric potential gradient // Proc. Roy. soc. A. V. 90. P. 571–582.

**РОЛЬ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В СУТОЧНОЙ
ДИНАМИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ**

А. Х. Аджиев, А. А. Черкесов

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: cherkesov2018@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.07.2023
Поступила после доработки 7.09.2023

Введение

В исследованиях влияния солнечной активности на геосферные процессы очень важен анализ динамики напряженности электрического поля приземной атмосферы. Особый интерес представляют результаты измерений напряженности электрического поля в высокогорных условиях, где влияние антропогенных факторов сведено к минимуму (Аджиев, Куповых, 2004). В последние годы внимание к солнечно-земным связям повысилось (Антохин и др., 2018; Корсаков, Козлов, 2018; Аджиева, Черкесов, 2021).

В 2018 г. в Петропавловске-Камчатском состоялась IX международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», на которой обсуждались результаты оригинальных исследований физических процессов в различных слоях атмосферы, околоземном космическом пространстве и твердой оболочке Земли. В качестве одного из актуальных направлений исследований на конференции рассматривалось влияние солнечной активности на магнитосферу и ионосферу Земли.

Наличие корреляционной связи интенсивности космических лучей и напряженности электрического поля подтверждено наблюдениями в горных районах (Кречетов, Филиппов, 2000). Линейное уменьшение напряженности поля от падения интенсивности космических лучей во время Форбуш-понижений обнаружено в обсерваториях «Nagyusenk», Венгрия (Marcz, 1997) и «Паратунка», Россия (Чернева, Кузнецов, 2005; Кузнецов, Чернева, 2008).

Настоящая работа посвящена исследованию суточной динамики приземного электрического поля атмосферы под действием факторов солнечной активности.

Материалы и методы исследования

Для исследования влияния солнечной активности на вариации напряженности электрического поля атмосферы был рассмотрен суточный ход напряженности электрического поля атмосферы в дни «хорошей» погоды — ясные дни (с облачностью менее 3 баллов), без осадков, со скоростью ветра до 6 м/с и температурой воздуха в пределах от -50 до $+50$ °С.

Солнечная активность характеризовалась числом солнечных вспышек разного класса, которые выбирались по регистрациям с сайта <https://sohoftp.nascom.nasa.gov/sdb/goes>. Напряженность электрического поля измерялась прибором EFM 550 (www.vaisala.com), установленным на высокогорной метеостанции «Пик Чегет» на высоте 3100 м над ур. м., что позволяет исключить антропогенное влияние (Князева, Черкесов, 2020). При контроле состояния атмосферы учитывались метеорологические характеристики: осадки, облачность, температура воздуха. Характеристики электрического поля, полученные на станции «Пик Чегет» при «хорошей» погоде, соответствуют классическому суточному ходу электрического поля — кривой Карнеги (Harrison, 2004).

График изменения количества солнечных вспышек и пятен для выбранного периода наблюдений представлен на рис. 1.

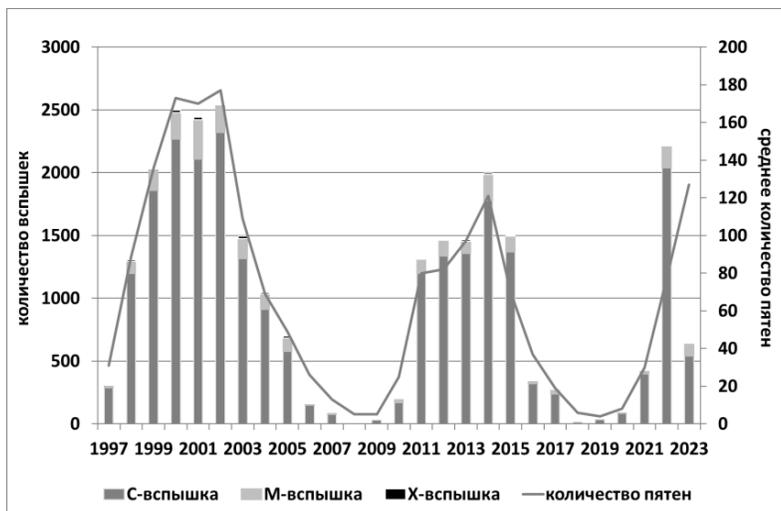


Рис. 1. Изменение количества солнечных вспышек С-, М-, Х-класса и пятен с 1997 по 2023 г. (www.spaceweatherlive.com)

В последнем 11-летнем цикле солнечной активности максимальное и минимальное количество солнечных вспышек наблюдалось в 2014 и 2019 гг. Поскольку измерения напряженности электрического поля атмосферы в указанные годы на метеостанции «Пик Чегет» не проводились по техническим причинам, в работе были использованы данные за 2013 и 2018 гг. В 2013 г. количество вспышек и солнечных пятен на Солнце было близко к пиковым, а в 2018 г. их количество было минимальным.

Изменения напряженности электрического поля приземной атмосферы под действием солнечной активности

Солнечные вспышки и различия в скорости истечения плазмы приводят к образованию в межпланетном пространстве ударных волн, которые характеризуются резким скачком скорости, плотности

и температуры. Ударные волны и возникающие в них тангенциальные разрывы сносятся солнечным ветром на большие гелиоцентрические расстояния и регулярно регистрируются космическими аппаратами. Высокоскоростные потоки солнечного ветра, обтекая Землю, воздействуют на ее магнитосферу и более низкие слои атмосферы. Атмосферное электричество может выступать в качестве индикатора этого взаимодействия, в частности, напряженность поля приземной атмосферы прямо пропорциональна потенциалу ионосферы.

Исследования связей характеристик солнечного ветра с динамикой электрического поля приземной атмосферы ранее практически не проводились, хотя факт такой связи отмечен рядом исследователей (Смирнов и др.). Основной причиной этого является трудность установления вклада различных факторов (погодных, антропогенных, ионосферных, грозových и др.) в формирование динамики электрического поля приземной атмосферы. Метод контроля электрического поля атмосферы под действием характеристик солнечного ветра, применяемый в ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», основан на регистрации электрических характеристик атмосферы при синхронном мониторинге погодных явлений в экологически чистом районе Приэльбрусья. Высотное расположение станции «Пик Чегет» позволяет осуществлять контроль изменения поля Земли при различных значениях скорости солнечного ветра и плотности протонов в нем. Для этого осуществлялись сравнения значений напряженности поля приземной атмосферы при различных характеристиках солнечной активности.

Для исследования влияния солнечной активности на напряженность электрического поля атмосферы нами рассмотрены точные вариации в годы максимальной (2013) и минимальной (2018) солнечной активности: 11 случаев в 2013 и 9 случаев в 2018 г. (рис. 2). При сравнении данных за указанные годы можно отметить, что значения напряженности за 2013 г. почти в 2 раза превышают значения, полученные в 2018 г., т. е. период высокой солнечной активности характеризуется большой амплитудой среднесуточной напряженности электрического поля.

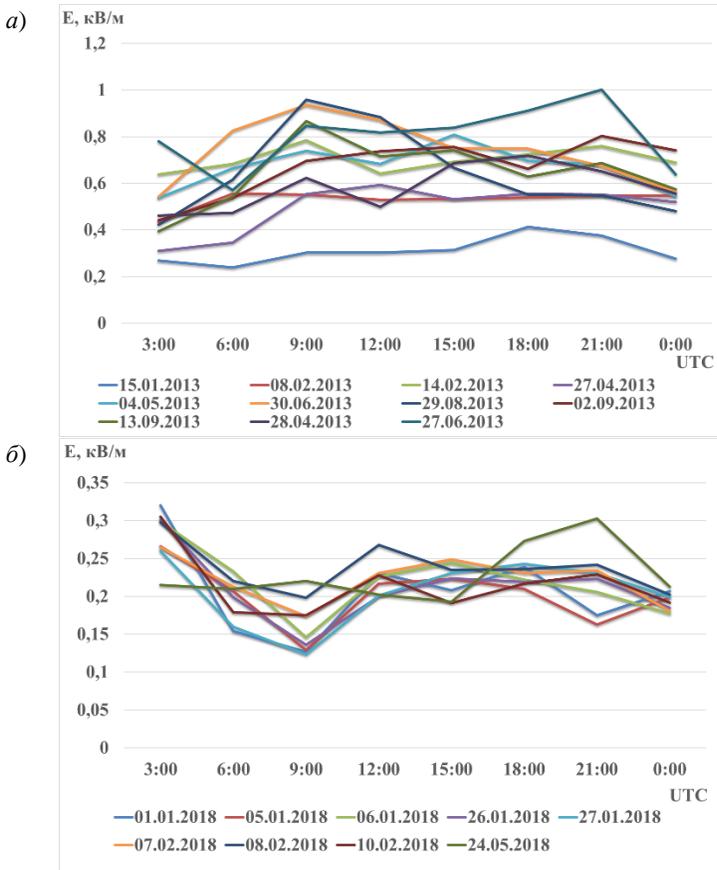


Рис. 2. Суточные вариации напряженности электрического поля атмосферы в различные дни 2013 (а) и 2018 г. (б)

Суточный ход в разные дни 2018 г. имеет схожие амплитуды колебаний и временной ход, похожие на естественный ход — унитарную вариацию напряженности (рис. 2б). В суточном ходе напряженности электрического поля в отдельные дни 2013 г. (рис. 2а), когда наблюдался период высокой солнечной активности, унитарная вариация приземной атмосферы не прослеживается. Амплитуда

колебаний поля имеет хаотический вид, разброс значений напряженности электрического поля варьирует от 230 до 1000 В/м. Это свидетельствует о том, что солнечная активность оказывает влияние на электрическое поле приземной атмосферы. Аналогичные закономерности наблюдаются при сравнении и других дней с «хорошей» погодой в указанные годы.

Выводы

В условиях «хорошей» погоды при повышенной солнечной активности амплитуда суточного хода напряженности электрического поля приземной атмосферы может увеличиваться примерно в 2 раза по сравнению со значениями, характерными для естественного фона.

В период высокой солнечной активности унитарная вариация напряженности электрического поля приземной атмосферы не воспроизводится. Амплитуда колебаний поля имеет хаотический вид, разброс значений напряженности электрического поля варьирует от 230 до 1000 В/м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аджиев А. Х., Куповых Г. В. (2004). Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. — Таганрог: Изд-во ТРТУ. 137 с.

Аджиева А. А., Черкесов А. А. (2021). Космическая погода и климатические явления в атмосфере // Наука. Инновации. Технологии. Вып. 3. С. 91–105. DOI: 10.37493/2308-4758.2021.3.6.

Антохин П. Н., Аришинов М. Ю., Белан Б. Д., Белан С. Б., Давыдов Д. К., Савкин Д. Е., Скляднева Т. К., Толмачев Г. Н., Фофонов А. В. (2018). Роль солнечной активности в многолетней изменчивости фотохимических компонент воздуха в приземном слое воздуха / Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: IX международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 17–21 октября 2018 г.: Сборник тезисов. — Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. С. 22.

Князева З. М., Черкесов А. А. (2020). Вариации напряженности поля атмосферы и плотности протонов солнечного ветра по данным EFM550 на горе Чегет / Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива-2020». С. 223–226.

Корсаков А. А., Козлов В. И. (2018). Эффекты геофизических событий 4–11 сентября 2017 г. в вариациях амплитуды и фазы ОНЧ сигналов радиостанций при регистрации в Якутске и Тикси / Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: IX международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 17–21 октября 2018 г.: Сборник тезисов. — Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. С. 27.

Кречетов А. А., Филиппов А. Х. (2000). Электрическое поле атмосферы и интенсивность космических лучей / В сб.: Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. — М.: ОИФЗ РАН. С. 30–32.

Кузнецов В. В., Чернева Н. В. (2008). Исследование Форбуш-понижений и эффектов терминатора в атмосферном электрическом поле на обсерватории «Паратунка» (Камчатка) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. Вып. 11. № 1. С. 89–97.

Смирнов С. Э., Михайлова Г. А., Капустина О. В. (2013). Вариации спектров мощности электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в ноябре 2004 г. / Глобальная электрическая цепь: материалы Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта. — Ярославль. С. 107–109.

Чернева Н. В., Кузнецов В. В. (2005). Форбуш-понижения и эффекты терминатора в атмосферном электричестве Камчатки / Международная Байкальская научная школа по фундаментальной физике «Астрофизика и физика околоземного космического пространства». Ч. 1. — Иркутск. С. 37–40.

Harrison R. G. (2004). The Global Atmospheric Electrical Circuit and Climate // *Surv Geophys.* V. 25. С. 441–484. DOI 10.1007/s10712-004-5439-8.

Marcz F. (1997). Short-term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* V. 59. № 9. P. 975–982.

УДК 551.58

Специализированная климатическая информация для подготовки региональных планов адаптации к изменению и изменчивости климата (на примере Ленинградской области). Акентьева Е. М., Клюева М. В., Фасолько Д. В., Самойлова Е. П., Разова Е. Н. Труды ГГО. 2023. Вып. 209. С. 8–29.

На примере основных секторов экономики Ленинградской области рассмотрено влияние климатических характеристик и их изменений на функционирование объектов и процессов в этих отраслях с целью выявления наиболее значимых погодно-климатических рисков и их составляющих на территории области. Эта информация позволяет разработать стратегии управления этими рисками и адаптации к изменению и изменчивости климата на региональном уровне.

Ключевые слова: изменения климата, адаптация, строительство, транспорт, здоровье

Табл. 1. Ил. 6. Библ. 23.

УДК 551.510

Корректировка аналитического решения уравнения атмосферной диффузии, предложенного А.С. Мониным. Генихович Е. Л., Румянцев Д. Ю. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 30–47.

С использованием методов теории размерностей показано, что в предложенном А.С. Мониним аналитическом решении уравнения атмосферной диффузии допущена ошибка. Предложен способ корректировки этой ошибки. Показано, что результаты расчетов по откорректированной формуле совпадают с результатами численного интегрирования при варьировании аргументов и определяющих параметров с точностью до возможных погрешностей численного интегрирования. Отмечена возможность использования откорректированной формулы при разработке, тестировании и валидации численных климатических моделей и химических транспортных моделей

Ключевые слова: атмосферная диффузия, уравнение, загрязнение воздуха, анализ размерностей, аналитическое решение, численное решение.

Ил. 7. Библ 4.

УДК 551.501.7

О развитии методов штормового оповещения в Северо-Западном регионе на основе разнородной геофизической информации с привлечением алгоритмов машинного обучения. Тарабукин И. А., Дорофеев Е. В., Львова М. В., Михайловский Ю. П., Дмитриева О. А., Богомазова Е. Я., Горбатовская А. С. Кузьменко П. Ю. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 48–63.

Рассмотрены вопросы сбора, обработки, обмена и отображения различного рода гидрометеорологической и геофизической информации в задачах диагноза и прогноза опасных гидрометеорологических явлений. Особое внимание уделено радиофизическим средствам мониторинга территории Северо-Западного региона. Произведен обзор существующих решений в вопросах наукастинга, в том числе, с привлечением методов искусственного интеллекта в задачах классификации гидрометеоров, обнаружения закономерностей и прогнозирования изменений погодных условий.

Ключевые слова: геофизическая информация; информационная система, опасные явления погоды, штормовое оповещение, алгоритмы распознавания, машинное обучение, искусственный интеллект.

Ил. 3. Библ. 13.

УДК 551.515.4:551.501.81

Градовые облака Северо-Запада Российской Федерации. Синькевич А. А., Торопова М. Л., Михайловский Ю. П., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Тарабукин И. А. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 64–77.

Представлены результаты радиолокационных исследований градовых облаков Северо-Западного региона Российской Федерации. Выбраны случаи подтвержденного наблюдателями выпадения града за период 2017–2022 гг. и соответствующие облака по данным доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ-С). Проанализированы значения радиолокационных параметров облаков во время выпадения града, получены статистические характеристики. Рассмотрена микрофизическая структура облаков. Показаны сильные корреляционные связи между объемами облака с градом и крупой и прочими радиолокационными параметрами.

Ключевые слова: град, крупа, поляризационные радиолокационные характеристики, микрофизическое строение облака.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 19.

УДК 551.594

Результаты сравнения данных ДМРЛ и грозопеленгационных систем.
Снегуров А. В., Снегуров В. С. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С.78–102.

Показано, что грозопеленгационные системы регистрируют молниевые разряды не только в грозовых и градовых облаках, но и в облаках с конвективными осадками разной интенсивности. Между числом молниевых разрядов и количеством метеоявлений по данным ДМРЛ в десятиградусных секторах в зоне до 200 км существует слабая корреляционная связь.

Наиболее эффективными являются модели в которых сравниваются плотности молниевых разрядов $\rho_{N(alw)}$, $\rho_{N(lf)}$ и плотности метеоявлений $\rho_{N(oa)}$ по десятикилометровым интервалам. В них коэффициенты детерминации изменяются от 0,71 до 0,98. Погрешности аппроксимации равны 7,3 — 12,3 %.

Ключевые слова: грозопеленгационные системы, доплеровский метеорологический радиолокатор, метеоявления, молниевые разряды, эффективность, корреляционные связи, коэффициенты детерминации

Табл. 7. Ил. 10. Библ. 3.

УДК 551.521

Прозрачность атмосферы на территории России: текущие изменения в XXI в. Махоткин А. Н., Махоткина Е. Л., Плахина И. Н. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 103–119.

Рассмотрены особенности изменения прозрачности атмосферы на территории России в 2000–2022 гг. Объектом исследования явились ряды месячных и годовых значений фактора мутности T_2 и аэрозольной оптической толщины атмосферы АОТ для основных регионов России. Проанализированы тенденции изменения T_2 и АОТ в различных регионах, определены средние многолетние T_2 и АОТ и особенности их годового хода. Показано, что в XXI в. усилилось проявление региональных особенностей, выразившееся в стабилизации и даже некотором увеличении мутности атмосферы в южных районах ЕТР и Средней Сибири. Однако на большей части территории России тенденция к уменьшению интегральной и аэрозольной мутности атмосферы сохраняется.

Ключевые слова: прозрачность атмосферы, атмосферный аэрозоль, сетевые наблюдения, средние многолетние, тренды.

Табл. 4. Ил. 5. Библ. 17.

УДК 551.509.617

Экспериментальные исследования льдообразующих свойств кластеров из нанотрубок оксида алюминия. Залиханов М. Ч., Хучунаев Б. М., Геккиева С. О., Будаев А. Х. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 120–131.

Представлены результаты исследования льдообразующих свойств алюминия с целью возможного повышения эффективности пиротехнических составов, используемых в противорадиационных изделиях (ПРИ) типа «Алазань-6» и «Алазань-9». Получены кластеры из нанотрубок оксида алюминия в присутствии водяного пара при отрицательных температурах. Размер и форма кластеров зависят от температуры возгонки, давления и газовых составляющих среды, в которой происходит возгонка. Выявлено, что кластеры из нанотрубок Al_2O_3 обладают льдообразующими свойствами с порогом кристаллизующего действия -3 °С. Также создан специальный комплекс аппаратуры и методика проведения эксперимента в присутствии водяного пара.

Ключевые слова: активные воздействия, пиротехнический состав, реагент, льдообразующие частицы, алюминий, оксид алюминия, кластеры, нанотрубки.

Рис. 4. Табл. 1. Библ. 12.

УДК 551.578.7

Результаты апробации прогноза града по выходным данным глобальной модели атмосферы в зоне ответственности Северо-Кавказской военизированной службы. Залиханов М. Ч., Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 132–143.

В ходе исследования проводится расчет параметров атмосферы по данным глобальной модели GFS NCEP с заблаговременностью 30 часов, по которым проводится прогноз града. Такая схема прогнозирования града апробирована на территории ответственности Северо-Кавказской военизированной службы. Результаты апробации показали общую оправдываемость, равную 87%, и предупредительность наличия явления 76%. Критерии качества прогнозов показали также высокие значения. Сделан вывод о хороших перспективах предлагаемого подхода для внедрения в оперативную практику противорадиационных служб.

Ключевые слова: глобальная модель атмосферы, аэрологическое зондирование, метеорологические параметры атмосферы, прогнозирование града.

Табл. 2. Рис. 1. Библ. 12.

УДК 551.501.85

Результаты районирования территории Кабардино-Балкарии по интенсивности и частоте градобитий. Инюхин В.С., Чередник Е.А. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 144–155.

КБР является территорией, часто подвергающейся градобитию. В среднем за летний сезон на ее территории наблюдается 30 дней с градом. На основе многолетних радиолокационных наблюдений за градовыми процессами проведено районирование территории Кабардино-Балкарии по интенсивности и частоте градобития. Выявлены административные районы, наиболее неблагоприятные для производства сельхозрастений. Впервые получена карта интегральной градоопасности района исследования за период 2003–2022 годы. В качестве критерия для оценки территорий с неблагоприятными условиями для производства сельхозпродукции был введен региональный показатель градоопасности k_i .

Ключевые слова. База данных, градовые облака, радиолокационные данные, размер града, поток кинетической энергии града, административный район, региональный показатель градоопасности.

Ил.4. Библ. 13.

УДК 551.515.9

Град в центральной части Северного Кавказа. Лиев К. Б., Кущев С. А. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 156–164.

Приведена статистика за 20 лет (2003–2022 гг.) по распределению дней с градом по месяцам, выявлен самый градоопасный месяц для данной территории. Создана карта зарождения градовых облаков на территории центрального Кавказа, выявлено время зарождения градовых облаков и время их максимального развития в пике отражаемости

Ключевые слова: град, градовые ячейки, градоопасность, градовые облака, центральный Кавказ, градобитие, МРЛ-5, отражаемость.

Ил. 3. Библ. 5.

УДК 551.501.81

Обратное рассеяние радиоволн от столбчатых облачных кристаллов.

Залиханов М. Ч., Созаева Л. Т. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 165–175.

Проведены расчеты сечений обратного рассеяния радиоволн от столбчатых облачных кристаллов. Форму реальных столбчатых кристаллов можно аппроксимировать сфероидами согласно экспериментальным данным. Расчеты проведены методом разделения переменных для несферических (сфероидальных) частиц SVM. Показано, что сечения обратного рассеяния реальных кристаллов отличаются от сечений в сферическом приближении. Сделано заключение о необходимости учета формы кристаллов при математическом моделировании и дистанционном зондировании градовых облаков.

Ключевые слова: сечения обратного рассеяния, метод разделения переменных, облачные ледяные кристаллы, радиолокация, поляризованные электромагнитные волны.

Табл. 1. Рис. 1. Библ. 14.

УДК 551.594

Влияние аэрозольного загрязнения атмосферы на напряженность электрического поля в районе карьера открытых горных разработок
Зекореев Р.Х. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 176–184.

Приведены результаты исследования влияния антропогенного загрязнения на состояние электрического поля в приземном слое атмосферы в ясную погоду в районе Мукуланского карьера на Северном Кавказе. Установлено, что повышенные значения напряженности электрического поля, обусловлены аэрозольным загрязнением в районе карьера открытых горных разработок. Приводятся данные о средних размерах и концентрации аэрозольных частиц в районе карьера, образующихся в процессе механического дробления и разрушения горных пород, а также при движении тяжелого транспорта в процессе добычи полезных ископаемых внутри карьера. Предлагается использовать измерения напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы в качестве индикатора аэрозольного загрязнения воздуха в районах горных разработок.

Ключевые слова: Аэрозольные частицы, загрязнение, горная порода, карьер, электризация, напряженность электрического поля, флюксметр.

Ил.2. Библ.16.

УДК 551.590.21

Роль солнечной активности в суточной динамике электрического поля приземной атмосферы. Аджиев А. Х., Черкесов А. А. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 185–191.

Рассмотрено влияние солнечной активности на суточный ход вариаций напряженности электрического поля приземной атмосферы. Для этого осуществлялись сравнения значений напряженности поля приземной атмосферы при разной интенсивности солнечной активности. Для исключений возможного влияния погодных явлений на значения напряженности поля, при анализе отбирались те значения, которые получены при «хорошей погоде». Показано, что на формирование электрического поля локального масштаба оказывает влияние количество и интенсивность солнечных вспышек С-, М-, Х-класса. В условиях «хорошей погоды» при повышенной солнечной активности амплитуда суточного хода напряженности электрического поля приземной атмосферы может увеличиваться примерно в 2 раза по сравнению со значениями, характерными для естественного фона.

Ключевые слова: Солнечно-земные связи, скорость солнечного ветра, плотность протонов солнечного ветра, напряженность электрического поля, солнечная вспышка.

Ил. 2. Библ.11.

Tailored climate information for the preparation of regional adaptation plans to climate change and variability (on the example of the Leningrad region). Akentyeva E. M., Klueva M. V., Fasolko D. V., Samoylova E. P., Razova E. N. Proceedings of MGO. 2023. V. 2023. P. 8–29.

The main sectors of the economy of the Leningrad region are considered. The influence of climatic characteristics and their changes on the sustainable functioning of objects in these economy sectors is analyzed. The most significant weather and climate risks and their components in the region have been identified. The information obtained allows the development of strategies to manage these risks and adapt to climate change and variability at the regional level.

Keywords: climate change, adaptation, construction, transport, health

Tab. 1. Fig. 6. Ref. 23.

Correction of the analytical solution of the equation of atmospheric diffusion derived by A.S. Monin. Genikhovich E. L., Rumyantsev D. Yu. Proceedings of the MGO. 2023. V. 609. P. 30–47.

The analytical solution of the equation of atmospheric diffusion (EAD) derived by A.S. Monin, which was published in the book “Advances in Geophysics, v. 6, 1959”, does not satisfy the requirements of the dimensional homogeneity. We introduce a correction of the formula suggested by Monin, which is consistent with the requirements of the dimensional analysis. Results of calculations with the corrected formula are in very good agreement with the corresponding results of the numerical integration of the EAD under consideration. In practical applications, the corrected formula could be used in development, testing and evaluation of numerical climatic models and chemical transport models.

Keywords: Atmospheric diffusion, equation, air pollution, dimensional analysis, analytical solution, numerical solution.

Fig. 7. Ref. 4.

About the development of storm warning methods in the Northwest region based on heterogeneous geophysical information involving machine learning algorithms. Tarabukin I A, Dorofeev E. V., Lvova M. V., Mikhailovsky Yu. P., Dmitrieva O. A., Bogomazova E. Ya, Gorbatovskaya A. S., Kuzmenko P. Yu. Proceedings of the MGO. 2023. V. 609. P. 48–63.

The issues of collecting, processing, exchanging and displaying various kinds of hydrometeorological and geophysical information in the tasks of diagnosis and forecast of dangerous hydrometeorological phenomena are considered. Particular attention is paid to radiophysical means of monitoring the territory of the North-Western region. A review of existing solutions in matters of nocasting was carried out, including those involving artificial intelligence methods in the classification of hydrometeors, detection of patterns and forecasting changes in weather conditions.

Keywords: geophysical information; information system, hazardous weather phenomena, storm warning, recognition algorithms, machine learning, artificial intelligence.

Fig. 3. Ref. 13.

Hail clouds in the north-west of the Russian Federation. Sin'kevich A. A., Toropova M. L., Mikhailovskii Yu. P., Veremei N. E., Kurov A. B., Tarabukin I. A. Proceedings of MGO. 2023. V.609. P. 64–77.

The results of radar studies of hail clouds in the North-Western region of the Russian Federation are presented. Cases of observer-confirmed hail events for the period 2017–2022 were selected and corresponding clouds according to Doppler C-band weather radar (DMRL-C) data. The values of radar parameters of clouds during hailstorm were analyzed and statistical characteristics were obtained. The microphysical structure of clouds is considered. Strong correlations are shown between the volumes of clouds with hail and graupel and other radar parameters.

Keywords: hail, graupel, polarimetric radar characteristics, microphysical cloud structure.

Fig. 3. Tab. 1. Ref. 19.

Results of comparison of DMRL data and lightning detection systems.

Snegurov A. V., Snegurov V. S. Proceedings of MGO.V. 609. P. 78–102.

The paper shows that lightning detection systems register lightning discharges not only in thunderstorm and hail clouds, but also in clouds with convective precipitation of varying intensity. There is no high correlation between the number of lightning discharges and the number of meteorological occurrences according to Doppler Meteorological Radar data in ten-degree sectors at distances up to 200 km.

The most effective models are models that compare the densities of lightning discharges $\rho_{N(alw)}$, $\rho_{N(lf)}$ and the densities of meteorological phenomena $\rho_{N(oya)}$ over ten-kilometer intervals. In these intervals, the determination coefficients vary from 0.71 to 0.98. Approximation errors are 7.3 — 12,3 %.

Keywords: lightning direction finding systems, Doppler meteorological radar, meteorological phenomena, lightning discharges, efficiency, correlations, determination coefficients

Tab. 7. Fig. 10. Ref. 2.

The transparency of the atmosphere in Russia: current changes in the XXI century. Makhotkin A. N., Makhotkina E. L., Plakhina I. N. Proceedings of MGO. 2023. V.609. P. 103–119.

The features of a change in the transparency of the atmosphere in Russia in 2000–2022 are considered. The object of the study was the rows of menstruation and annual values of the turbidity factor T_2 and the aerosol optical thickness of the atmosphere of AOD for the main regions of Russia. The trends of the changes in T_2 and the AOD in various regions are analyzed, the average long-term T_2 and AOD and the features of their annual move are determined. It is shown that in XXI, the manifestation of regional features was intensified, expressed in stabilization and even a certain increase in the turbidity of the atmosphere in the southern regions of ETR and Middle Siberia. However, in most of Russia, the tendency to reduce the integral and aerosol turbidity of the atmosphere remains.

Keywords: atmospheric transparency, atmospheric aerosol, network observations, long-term averages, trends.

Tab. 4. Fig. 5. Ref. 17.

Experimental studies of ice-forming properties of aluminum oxide nanotube clusters. Zalikhanov M. Ch., Khuchunaev B. M., Gekkieva S. O., Budaev A. Kh. Proceedings of MGO. 2023. V. 609. P. 120–131.

The results of a study of the ice-forming properties of aluminum are presented with the aim of possibly increasing the efficiency of pyrotechnic compositions used in anti-hail products of the Alazan-6 and Alazan-9 types. Clusters of aluminum oxide nanotubes were obtained in the presence of water vapor at subzero temperatures. The size and shape of the clusters depend on the sublimation temperature, pressure and gas components of the medium in which the sublimation occurs. It was revealed that clusters of Al₂O₃ nanotubes have ice-forming properties with a crystallizing threshold of -3°C . A special set of equipment and a technique for conducting experiments in the presence of water vapor have also been created.

Keywords: cloud active effects, pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles, aluminum, aluminum oxide, clusters, nanotubes.

Tab.1. Fig.4. Ref. 12.

The results of testing the hail forecast based on the output data of the global atmospheric model in the area of responsibility of the North-Caucasus Special Service on Weather Modification. Zalikhanov M. Ch., Kagermazov A. Kh., Sozaeva L. T. Proceedings of MGO. 2023. V. 609.P. 132–143.

In the course of the research, atmospheric parameters are calculated according to the global atmospheric model GFS NCEP with a lead time of 30 hours, according to which the hail forecast is carried out. Such a hail forecasting scheme has been tested on the territory of responsibility of the North Caucasus Special Service on Weather Modification. The results of the approbation showed an overall justifiability equal to 87%, and the prevention of the presence of the phenomenon 76%. The forecast quality criteria also showed high values. The conclusion is made about the good prospects of the proposed approach for integration into operational practice of anti-hail services.

Keywords: global atmospheric model, aerological sounding, meteorological parameters of the atmosphere, hail forecasting.

Tab.2. Fig.1. Ref. 12.

Results of zoning the territory of Kabardino-Balkaria according to the intensity and frequency of hailstorms. Inyukhin V. S., Cherednik E. A. Proceedings of the GGO. 2023. V. 609. P. 144–155.

The CBD is an area often subject to hail damage. On average, 30 days with hail are observed on its territory during the summer season. Based on long-term radar observations of hail processes, the territory of Kabardino-Balkaria was zoned according to the intensity and frequency of hail. Administrative regions that are most unfavorable for the production of agricultural plants have been identified. For the first time, a map of the integral urban hazard of the study area was obtained for the period 2003-2022. As a criterion for assessing territories with unfavorable conditions for agricultural production, a regional hail hazard indicator k_i was introduced.

Keywords. Database, hail clouds, radar data, hail size, hail kinetic energy flow, administrative region, regional hail hazard index.

Fig. 4. Ref. 13

Hail in the central part of the North Caucasus. Liev K. B., Kushchev S. A. Proceedings of the GGO. 2023. V. 609. P. 156–164.

Statistics for the past 20 years (2003-2022) on the distribution of hail days by months have been provided. The most hail-prone month for this area has been identified. A map of hail cloud formation in the Central Caucasus region has been created. The time of hail cloud formation and the time of their maximum development during the peak of reflectivity have been determined.

Keywords: hail, hail cells, hail hazard, hail clouds, central Caucasus, hail, MRL-5, reflectivity.

Fig. 3. Ref. 5.

Backscattering of radio waves from columnar cloud crystals.

Zalikhhanov M. Ch., Sozaeva L. T. Proceedings of MGO. 2023. V. 609. P. 165–175.

Calculations of backscattering cross sections of radio waves from columnar cloud crystals have been carried out. The shape of real columnar crystals can be approximated by spheroids according to experimental data. Calculations were carried out using the separation of variables method for non-spherical (spheroidal) particles SVM. It is shown that the backscattering cross sections of real crystals differ from the cross sections in the spherical approximation. A conclusion is made about the need to take into account the shape of crystals in mathematical modeling and remote sensing of hail clouds.

Keywords: backscattering cross sections, variable separation method, cloud ice crystals, radar, polarized electromagnetic waves.

Tab.1. Fig. 1. Ref. 14.

Influence of aerosol pollution of the atmosphere on the electric field strength in the area of open pit mining.

Zekoreev R.Kh. Proceedings of the GGO. 2023. V.607. P. 176–184.

The results of a study of the influence of anthropogenic pollution on the state of the electric field in the surface layer of the atmosphere in clear weather in the area of the Mukulan quarry in the North Caucasus are presented. It has been established that the increased values of the electric field strength are due to aerosol pollution in the open pit area. Data are given on the average size and concentration of aerosol particles in the area of the quarry, formed, formed in the process of mechanical crushing and destruction of rocks, as well as during the movement of heavy vehicles in the process of mining inside the quarry. It is proposed to use measurements of the electric field strength in the surface layer of the atmosphere as an indicator of aerosol air pollution in mining areas.

Keywords: Aerosol particles, pollution, rock, quarry, electrization, electric field strength, fluxmeter.

Fig.2. Ref.16.

The role of solar activity in the daily dynamics of the electric field of the surface atmosphere. Adzhiev A. Kh., Cherkosov A. A. Proceedings of the MGO. 2023. V. 609. P. 185–191.

The influence of solar activity on the diurnal course of variations in the intensity of the electric field of the surface atmosphere is considered. For this purpose, the values of the field strength of the surface atmosphere at different solar activity intensities were compared. In order to exclude the possible influence of weather phenomena on the values of the field strength, the values obtained during the "good weather" were selected during the analysis. It is shown that the formation of a local scale electric field is influenced by the number and intensity of C-, M-, and X-class solar flares. Under conditions of "good weather" with increased solar activity, the amplitude of the diurnal course of the electric field strength of the surface atmosphere can increase by about 2 times compared to the values typical for the natural background.

Keywords. Solar-terrestrial relations, solar wind speed, solar wind proton density, electric field strength, solar flare

Fig. 2. Ref. 11.

Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 609

Подписано в печать 01.11.23. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 12,875. Тираж 300 экз. Заказ №1742.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ».

194044, Санкт-Петербург, Пироговская наб., д. 17 к. 6, литера А, помещ. 8..