

Федеральная служба  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. Воейкова

Выпуск

576

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

Санкт-Петербург  
2015

---

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

*Редакционная коллегия*

Д-р физ.-мат. наук В. М. Катцов, д-р физ.-мат. наук Е. Л. Генихович,  
канд. физ.-мат. наук А. С. Зайцев, д-р физ.-мат. наук, профессор И. Л. Кароль,  
д-р геогр. наук, профессор Н. В. Кобьшева, д-р физ.-мат. наук В. П. Мелешко,  
д-р геогр. наук А. В. Мещерская, д-р физ.-мат. наук, профессор  
О. М. Покровский, канд. физ.-мат. наук С. С. Чичерин,  
канд. геогр. наук Е. Л. Махоткина (секретарь редколлегии)

В сборнике представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по актуальным проблемам изменения климата и прогноза погоды, атмосферной диффузии и мониторинга состояния атмосферы, климатологии, дистанционного зондирования атмосферы.

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

Рекомендуется аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

*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.*

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

*Editorial board*

Dr. V. M. Kattsov, Dr. E. L. Genihovich, Dr. A. S. Zaitsev, Dr. I. L. Karol,  
Dr. N. V. Kobysheva, Dr. V. P. Meleshko, Dr. A. V. Mescherskaya,  
Dr. O. M. Pokrovsky, Dr. S. S. Chicherin, Dr. E. L. Makhotkina  
(Editorial board secretary)

The publication deals with the results of theoretical and experimental studies on the present-day problems of changes in climate and weather forecast, atmospheric diffusion and atmospheric air condition monitoring, climatology, remote sounding of the atmosphere.

The publication is meant for a wide circle of specialists interested in the results of meteorological science development and their practical application.

It is recommended for post-graduates and students in their third or fourth year of respective speciality.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»,  
2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Р. С. Бортковский, Е. Д. Надёжина, А. В. Стернзат, Т. В. Павлова, А. А. Пикалева, Б. Н. Егоров.</i> Влияние эволюции климатических характеристик в XXI веке на газообмен через поверхность Баренцева моря (численное моделирование).....	7
<i>В. М. Ивахов, И. Л. Кароль, А. А. Киселев, А. В. Зинченко, Н. Н. Парамонова, В. И. Привалов, Т. Лаурила, М. Аурела.</i> Результаты первых камерных измерений потоков метана на гидрометеорологической обсерватории «Тикси».....	27
<i>А. А. Синькевич, С. Д. Павар, А. Б. Куров, Н. Н. Волков, В. Ю. Михайловский, Н. Е. Веремей, В. Гонпалакришнан.</i> О влиянии аэрозолей естественного происхождения на температуру кристаллизации капель воды. ....	42
<i>Ю. А. Довгалюк, М. Л. Торопова, Н. Е. Веремей.</i> Исследование характеристик грозовых облаков и грозовой активности по данным наземных наблюдений и численного моделирования ( на примере станции г. Санкт-Петербурга). .	50
<i>А. М. Линкова, Г. И. Хлопов.</i> Восстановление микроструктурных характеристик жидких осадков с помощью активно-пассивного зондирования. ....	62
<i>Н.И. Герасименко, Б. Г. Зайнетдинов, В. Н. Морозов, И. Б. Попов.</i> Исследование вариаций напряженности электрического поля во время гроз с помощью методов вейвлет-анализа. ....	81
<i>И. В. Грищенко, Т. Н. Рюмина.</i> Грозы на европейском севере – вероятные погодно-климатические угрозы и риски. ....	92
<i>Л. И. Кижнер, Н. Ю. Серая.</i> Изменение режима ветра в Томске в начале XXI века. ....	102

<i>О. И. Золотухина, В. П. Горбатенко, П. А. Вареник.</i> Характеристики ветра в дни пусков ракет космического назначения на космодроме «Байконур». ....	114
<i>Н. К. Барашкова, М. А. Волкова, И. В. Кужевская.</i> Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской области. ....	129
<i>Г. И. Мазуров, В. В. Татаринов, О. В. Базарский, А. А. Томилов.</i> Методика                   метеозависимой геоэкологической оценки состояния окружающей среды и экологического риска для персонала аэродрома государственной авиации. ....	153
<i>Т. С. Селегей, Н. Н. Филоненко, Т. Н. Ленковская.</i> Приземный озон в Новосибирске. ....	166
<i>Н. А. Лавров.</i> Зональные потоки тепла и колебания температуры воздуха над европейской частью России и Западной Сибирью в центральные месяцы сезонов года. ...	177
<i>В. М. Фёдоров, Н. К. Кононова.</i> Солнечная радиация, приходящая на верхнюю границу атмосферы, и изменчивость циркуляционных процессов в Северном полушарии. ....	183

## CONTENTS

<i>E. D. Nadyozhina, A. V. Sternzat, R. S. Bortkovski, A. A. Pikalyova, B. N. Egorov, I. M. Shkolnik.</i> Model estimates of the oxygen transfer through Arctic seas surface .....	7
<i>V. M. Ivakhov, I. L. Karol, A. A. Kisilev, A. V. Zinchenko, N. N. Paramonova, V. I. Privalov., T. Laurila, M. Aurela</i> The results of the first chamber CH <sub>4</sub> flux measurements at hydrometeorological observatory “Tiksi”. .....	27
<i>A. A. Sinkevich, S. D. Pawar, A. B. Kurov, N. N. Volkov, V. Yu. Mikhailovskiy, N. E. Veremey, V. Gopalakrishnan.</i> An impact of natural aerosols on crystallization temperature of water drops. ....	42
<i>Yu. A. Dovgaluk, M. L. Toropova, N. E. Veremey.</i> Research of characteristics of storm clouds and thunderstorm activity according to ground-based observations and numerical modeling (for example, the station of Saint-Petersburg). ....	50
<i>A. M. Linkova, G. I. Khlopov.</i> Retrieval of microstructure characteristics of liquid precipitation by activ-passiv remote sensing. ....	62
<i>N. I. Gerasimenko, B. G. Zainetdinov, V. N. Morozov, I. B Popov.</i> Investigation of variations of electric field strength during thunderstorms by methods of wavelet analysis. ....	81
<i>I. V. Grischenko, T. N. Rumina.</i> Thunderstorms in the European North. Probable weather and climate threats and risks .	92
<i>L. I. Kizhner, N. U. Seraya.</i> Changing the wind in Tomsk in early twenty-first century. ....	102
<i>O. I. Zolotukhina, V. P. Gorbatenko, P. A. Varenik.</i> Features wind during the delayed of space rockets at the cosmodrome «Baikonur». ....	114

<i>N. K. Barashkova, M. A. Volkova, I. V. Kuzhevskaya.</i> Contemporary climate regime of precipitation in the Tomsk region. ....	129
<i>G. I. Mazurov, V. V. Tatarinov, O. V. Bazarsky, A. A. Tomilov.</i> Methodology of meteodependent geo-ecological assessment of the environment and environmental risk to personnel of state aviation airfield. ....	153
<i>T. S. Selegey, N. N. Filonenko, T. N. Lenkovskaya.</i> Ground-level ozone in Novosibirsk city. ....	166
<i>N. A. Lavrov.</i> Zonal heat fluxes of heat and air temperature fluctuations over the European part of Russia and Western Siberia in the central months of the year seasons. ....	177
<i>V. M. Fedorov, N. K. Kononova.</i> Solar radiation at the top of the atmosphere and the variability of atmospheric processes in the Northern Hemisphere. ....	183

УДК 551.465.7, 539.186, 551.576.1

**ВЛИЯНИЕ ЭВОЛЮЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК В XXI ВЕКЕ НА ГАЗООБМЕН ЧЕРЕЗ  
ПОВЕРХНОСТЬ БАРЕНЦЕВА МОРЯ  
(ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

*Р. С. Бортковский, Е. Д. Надёжина, А. В. Стернзат, Т. В. Павлова,  
А. А. Пикалёва, Б. Н. Егоров*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
e-mail: rsb@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.11.2014  
Поступила после доработки 27.01.2015

**Введение**

Данные наблюдений показывают, что в последние десятилетия в регионе Баренцева моря (БМ) в целом комплексе климатических характеристик проявляются изменения, (Levitus et. al., 2009; O'Brien et. al., 2004; Petoukhov and Semenov, 2010; Smedsrud et. al., 2010; Survey report, 2010), которые влияют и на процессы газообмена на поверхности раздела «вода-воздух». При этом существует опасность сокращения и даже полного прекращения стока диоксида углерода из атмосферы в воды Арктических морей, закисления воды и экологических катастроф на региональном, а, возможно, и на глобальном уровнях. По современным представлениям сток углерода в окраинные Арктические моря, к которым принадлежит и Баренцево море, сравним со стоком в Атлантический океан севернее 60-й параллели (Bates and Mathis, 2009). Исследования газообмена «вода-воздух» выполнялись неоднократно в последнее десятилетие (Furevik et. al., 2002; Kaltin et. al., 2002; Keup-Thiel et. al., 2006; Li-Quing Jiang et. al., 2008), однако до настоящего времени количественные оценки потоков  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , не говоря уже о потоках метана, выполняются с

большой неопределенностью. В работе (Gulev et al, 2009) отмечено, что для отдельных районов мирового океана даже знак потока  $\text{CO}_2$  не определяется достаточно надежно. Это обстоятельство побуждает искать новые пути для уточнения модельных описаний газообмена. Следует отметить также почти полное отсутствие экспериментальных данных о пространственных распределениях газовых потоков на акватории Баренцева моря. Исключение составляет работа (Nakaoka et al, 2006), где представлены пространственные распределения потоков  $\text{CO}_2$ , полученные на основе измерений концентрации  $\text{CO}_2$  в водах Баренцева моря. Работы последних лет (Arrigo et al, 2010; Land et al, 2007) посвящены анализу потоков  $\text{CO}_2$  в Арктическом регионе, полученных с использованием данных спутниковых наблюдений. В работе Р. С. Бортковского (2003) предложена модель газообмена, позволяющая уточнить количественные оценки пузырькового переноса газов в воде при сильном ветре. Эта модель была применена в работе Р. С. Бортковского с соавторами (2012) для оценки пространственного распределения потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  на акватории Баренцева моря в условиях современного климата с использованием климатических характеристик, вычисленных в узлах регулярной сетки с помощью региональной климатической модели (РКМ) ГГО и глобальной климатической модели (ГКМ) (ECHAM5/MPI-OM). В настоящей работе выполнен анализ количественных показателей реакции газопереноса «вода-воздух» на прогностические изменения климатических характеристик в исследуемом регионе в XXI веке. Баренцево море является одним из наиболее изученных окраинных морей России, однако неопределенность временной и пространственной изменчивости потоков газа через морскую поверхность, как в случае выполнения оценок на основе измерений концентрации газа в воде, так и при моделировании распределений концентрации в водной толще остается и в этом регионе весьма значительной. Вместе с тем для Баренцева моря существует возможность проведения сравнительных оценок потока  $\text{CO}_2$  на поверхности разными методами и возможность анализа преимущественного влияния на потоки различных параметризаций физических эффектов. При оценках газовых потоков в настоящей



работе выделена составляющая потока, создаваемая механизмом пузырькового газопереноса при сильных ветрах (Бортковский, 2003). В большинстве исследований, посвященных газопереносу «вода-воздух», расчет потоков газа выполняется на основе диффузионной формулы Ваннингофа (Wanninkhof et. al., 2009), в которой коэффициент обмена является эмпирической функцией скорости ветра. Разбиение суммарного потока на две составляющих и параметризация коэффициентов обмена каждой составляющей разными функциями обсуждается в работах (Stanley et. al., 2009; Woolf et. al., 2007). В работе Р. С. Бортковского с соавторами (2012) были проанализированы пространственные распределения потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в условиях современного климата. В настоящей работе наряду с анализом временных и пространственных распределений потоков  $\text{CO}_2$  в условиях современного климата представлены результаты оценок изменений газопереноса под влиянием эволюции климатических характеристик в XXI веке.

## **1. Модели и входные данные**

Для решения задачи о распределении газообмена по акватории Баренцева моря в условиях изменяющегося климата в настоящей работе используется комбинированный набор входных данных на регулярной сетке, позволяющий получить распределение потоков газа с помощью модели газообмена (МГО) (Бортковский, 2003). Решение основано на использовании системы разномасштабных моделей: ГKM + РКМ + МГО, при котором обеспечивается последовательный переход от характеристик, осредненных по ячейке ГKM, к описанию процессов масштаба, меньшего, чем пространственное разрешение РКМ. Региональная модель климата высокого разрешения, разработанная в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) (Школьник и др., 2000), позволяет существенно детализировать глобальные поля климатических характеристик. В настоящей работе использованы данные РКМ, имеющей пространственное разрешение 50 км. Граничные условия РКМ получаются путем пространственно-временной интерполяции

переменных глобальной модели атмосферы ГГО (разрешение по горизонтали 250 км, по вертикали — 25 слоев неравномерной толщины) с использованием метода вложенных сеток. Область расчетов по РКМ занимает территорию Арктического бассейна, включающую в себя Баренцево море, размером  $7550 \times 7550 \text{ км}^2$  с числом узлов сеточной области  $151 \times 151$ . Число узлов в расчетной области, включающей в себя бассейн Баренцево море, составило  $35 \times 25$ . Используются расчеты для периода 1981—2000 гг. и 2041—2060 гг. ГКМ ГГО и РКМ ГГО представляют собой атмосферные модели, при реализации которых не рассчитываются характеристики слоя воды. Эти модели не используются для оценки солёности и состояния ледового покрова. Реализация модели газопереноса требует задания граничных условий на нижней границе расчетной области, находящейся в воде. Полный набор входных параметров для этой модели может быть получен на основе глобальных климатических моделей, в которых воспроизводится временная эволюция водной толщи. Поэтому численные эксперименты, направленные на изучение эволюции газовых потоков на поверхности Баренцева моря, проведены с использованием результатов расчета климатических характеристик по глобальной климатической модели атмосферы и океана (ГКМАО) института метеорологии им. Макса Планка (ЕСНАМ5/MPI-OM), которые интерполировались в узлы сетки  $50 \times 50 \text{ км}$ . Данные ЕСНАМ выбраны из данных ансамбля моделей ГКМ, исходя из тех соображений, что они наилучшим образом воспроизводят эволюцию границы ледового покрова в Баренцевом море в настоящее время. Сравнение расчетных значений потоков газа, полученных с привлечением РКМ и полученных только на основе данных ЕСНАМ, проведено в работе Р. С. Бортковского с соавторами (2012) для средних значений характеристик за период 1981—2000 гг. Анализ расчетов показал, что при всех своих достоинствах ЕСНАМ существенно занижает значения средней скорости ветра над Баренцевым морем по сравнению с наблюдаемыми, тогда как по РКМ получаются более реалистичные значения скорости. Исходя из того, что средняя скорость ветра является весьма значимым параметром

при расчете потоков газа, оценки эволюции этих потоков в XXI веке выполнялись путем компиляции данных РКМ и ЕСНАМ.

Модель газопереноса используется в режиме оффлайн в узлах регулярной сетки РКМ с привлечением в качестве входных параметров средних сезонных значений температуры поверхности (ТП) воды, солёности, скорости ветра на высоте 10 м и характерных профилей температуры и солёности, полученных экспериментально для отдельных участков моря или рассчитанных на основе глобальной климатической модели атмосферы и океана. Параметр шероховатости морской поверхности и верхние граничные условия для составляющих скорости течений и масштаба турбулентной энергии были определены по заданной скорости ветра. Штормовые условия воспроизводились путем задания во всех точках расчетной области последовательного усиления скорости ветра от 11,5 до 26,5 м/с. Продолжительность этапа усиления скорости ветра в режиме реального времени соответствует экспериментальным сведениям о продолжительности штормов в Баренцевом море (Survey report, 2009). Таким образом, расчетные распределения потоков газа получаются как для средней скорости ветра, так и для нескольких штормовых скоростей из указанного диапазона значений.

Одномерная нестационарная численная модель верхнего слоя океана построена с учетом диффузионного газопереноса и переноса газа пузырьками при шторме (Бортковский, 2003, 2006; Бортковский и др., 2007; Bortkovskii, 2002). Газоперенос пузырьками непосредственно соотносится с характеристиками состояния морской поверхности — такими, как относительное покрытие ее пеной и продолжительность существования пятен пены. В модели учтено воздействие карбонатной системы морской воды на изменение содержания растворенного  $\text{CO}_2$ , происходящее в условиях штормового усиления ветра. В уравнения газопереноса для  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  входит внутренний источник, создаваемый пузырьками, заполняющими поверхностный слой океана при сильном ветре. Источник может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от степени насыщения воды газом. Предполагается, что нижняя граница расчетной области совпадает с нижней границей

пограничного слоя, определенной, как уровень, на котором кинетическая энергия турбулентности становится меньше заданного порогового значения. Этот уровень расположен ниже заданной глубины верхнего квазиоднородного слоя. На этапе инициализации модели газопереноса расчетные профили концентрации газов в воде соответствовали средним сезонным климатическим условиям. В диапазоне значений скорости ветра от 11,5 до 26,5 м/с в граничные условия вводятся параметры взаимодействия «вода-воздух» и соответствующие слагаемые источников/стоков в уравнения газопереноса. При реализации модели на каждом шаге по времени, составившем 25 с, вычислялись значения переменных для верхнего слоя БМ толщиной 123 м. Шаг по ординате менялся от 1 см у морской поверхности до 1,5 м у нижней границы слоя. Для расчета интегральных значений потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  за сезон использовалась аппроксимация плотности вероятности распределения скорости распределением Максвелла (Бортковский 1983, 2006; Bortkovskii, 2002). Использование функции распределения Максвелла позволяет учесть изменения сезонных распределений скорости ветра, связанные с эволюцией поля средней скорости ветра под влиянием потепления климата. Оценки проводились без учета биологических процессов, влияющих на концентрацию растворенного газа в воде.

Пространственные распределения температуры поверхности и солености в приповерхностном слое воды, полученные по данным реанализа осреднением за период 1981—2000 гг., хорошо согласуются с распределениями, полученными по модели ЕСНАМ (Бортковский и др., 2012). Пространственное распределение скорости ветра, полученное осреднением за тот же период выходных данных РКМ, как сказано выше, адекватно воспроизводит реальную картину. Перечисленные распределения были положены в основу оценок газовых потоков при современном климате (температура поверхности и соленость взяты по данным ЕСНАМ, а скорость ветра — по данным РКМ, и эти распределения считаются базовыми). Отклонения температуры поверхности, солености и скорости ветра в середине XXI века от значений этих характеристик за период 1981—2000 гг., полученные по данным ЕСНАМ5/MPI-OM на основе сценария

эмиссии парниковых газов и аэрозолей А2 МГЭИК, во всех узлах регулярной сетки, прибавлялись к базовым климатическим значениям (1981—2000 гг.). Таким образом получались прогностические значения этих характеристик. В качестве прогностических значений характеристик на нижней границе расчетной области модели газопереноса использованы выходные данные ЕСНАМ. Изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в приповерхностном слое атмосферы варьировались, исходя из данных мониторинга на станции Ни-Алезунд (Morimoto et al., 2001) и данных МГЭИК, использовавшихся ранее в работе (Бортковский и др., 2007). Дополним анализ распределений потоков газа в условиях современного климата, который проводился в работе Р. С. Бортковского с соавторами (2012), анализом внутригодовых изменений потоков  $\text{CO}_2$  на акватории Баренцева моря.

## **2. Внутригодовые изменения потоков $\text{CO}_2$ через поверхность Баренцева моря в условиях современного климата**

Временные изменения потоков газа через поверхность Баренцева моря в годовом цикле при современном климате оцениваются неоднозначно. Наиболее известными исследованиями этого направления являются работы (Nakaoka et. al., 2006; Omar et. al., 2007). В этих работах расчет потоков  $\text{CO}_2$ , выполняемый по формуле Ваннингофа, основан на натурных измерениях концентрации газа в воде, температуры и солености на разных уровнях, скорости ветра и количества льда в разные периоды времени и для разных участков акватории Баренцева моря. Проанализированы среднемесячные значения потока газа и соответствующие значения климатических характеристик, наиболее заметно влияющих на оценку потоков  $\text{CO}_2$ . При сравнении с оценками потока, приведенными в работе (Omar et. al., 2007), учитывались особенности участка акватории, на котором проводились наблюдения. Результаты анализа представлены на рис. 1. При этом расчет скорости ветра на акватории выполнен по данным РКМ. Расчетные среднемесячные значения получены осреднением за период 1981—2000 гг.

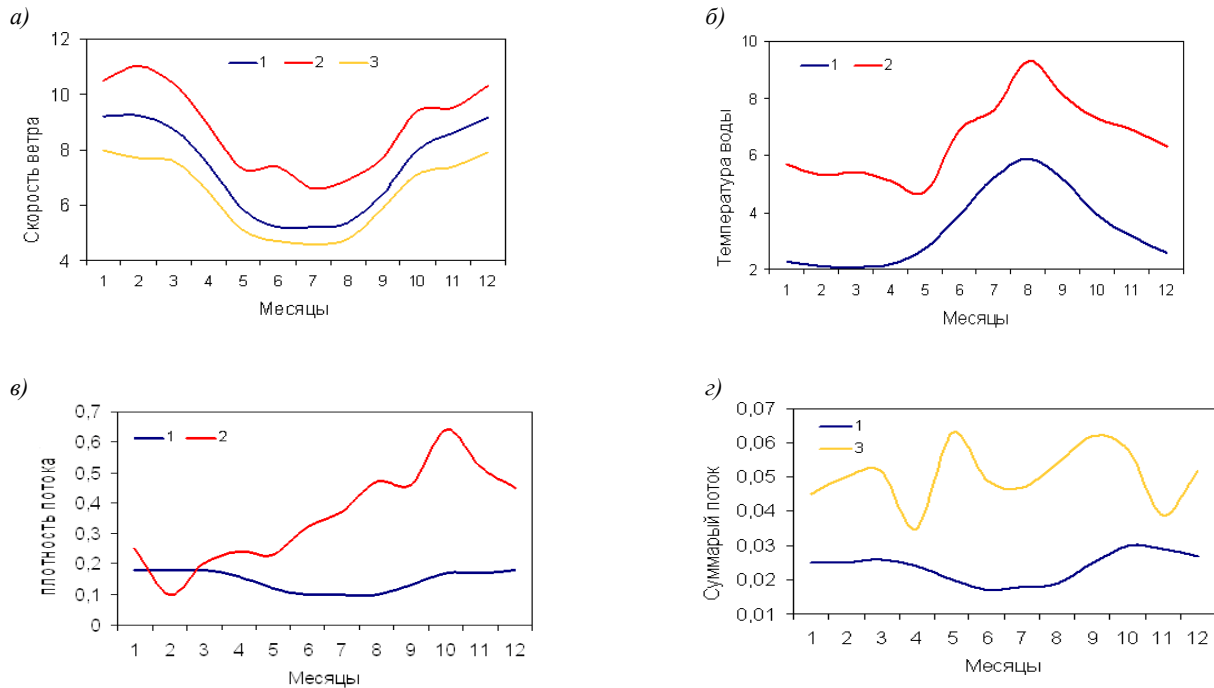


Рис. 1. Годовой ход осредненной скорости ветра (а), температуры приповерхностного слоя воды (б), плотности потока CO<sub>2</sub> (в), интегрального годового стока CO<sub>2</sub> (з) над акваторией Баренцева моря. 1 — модельные данные; 2 — данные из работы (Nakaoka et. al., 2006); 3 — данные из работы (Omar et. al., 2007).

Данные из работы (Nakaoka et. al., 2006) относятся к периоду наблюдений 1992—2001 гг., а в работе (Omar et. al., 2007) обобщены натурные данные пяти рейсов по Баренцеву морю за период 1995—2002 гг., выполнявшихся в разные месяцы года. Пробелы в наблюдениях в работе (Omar et. al., 2007) заполнены на основе эмпирических соотношений. Полученные в указанных работах ряды значений потоков  $\text{CO}_2$  обобщают в настоящий момент данные наиболее длинных периодов наблюдений, проводившихся в приводном слое, и предполагаются адекватно описывающими климатические значения потоков. На рис.1 видно, что годовой ход скорости ветра, осредненной по акватории Баренцева моря, удовлетворительно описывается данными РКМ. Вместе с тем скорости ветра по данным (Nakaoka et. al., 2006) оказываются несколько больше, чем модельные значения скоростей, а значения скоростей, измеренные за период 1995—2002 гг. (Omar et. al., 2007) — несколько меньше модельных. Максимальные различия в скорости ветра составляют около 2 м/с. В работе (Бортковский и др., 2012) показано, что средние значения скорости ветра, рассчитанные по ЕСНАМ5/МР1-ОМ, оказываются заниженными по сравнению с данными реанализа приблизительно в 1,5—2 раза. Особенно большие различия между данными глобальной климатической модели и данными реанализа наблюдаются летом. Осредненные по акватории значения температуры поверхности моря, полученные по данным реанализа, занижены по сравнению с данными работы (Nakaoka et. al., 2006). В работе (Omar et. al., 2007) отсутствуют данные о средней на акватории температуре. Очевидно, что обеспечить полную корректность сравнения данных не представляется возможным. Тем не менее, полученный результат сводится к следующему: различия в распределении потоков в годовом ходе наблюдаются как при сравнении потоков, рассчитанных на основе наблюдений разными авторами, так и при сравнении этих потоков с модельными значениями. Максимум плотности потока, распределение которой приведено в работе (Omar et. al., 2007), приходится на осенние месяцы, тогда как интегральный поток  $\text{CO}_2$  со всей акватории не имеет выраженного экстремума в годовом ходе. Модельные оценки в

годовом ходе и для плотности потока, и для интегрального стока  $\text{CO}_2$  мало отличаются от расчетных величин в отдельные месяцы, хотя в ходе этих величин отмечается небольшой минимум в летние месяцы. Количественные значения расчетной плотности потока  $\text{CO}_2$  в зимние месяцы близки к значениям, приведенным в (Omar et. al., 2007), а в летние и осенние месяцы — существенно меньше приведенных в указанной работе. Анализ рис. 1 показывает, что разброс значений интегрального потока  $\text{CO}_2$  в отдельные месяцы, полученный в работе (Nakaoka et. al., 2006), проявляется весьма заметно, тогда как модельная кривая годового хода получается сглаженной (рис. 1 в). Количественные значения расчетных интегральных потоков  $\text{CO}_2$  оказываются меньше потоков из работы Nakaoka et. al. (2006).

Представляет интерес сравнение пространственных распределений потока  $\text{CO}_2$  с данными из работы (Nakaoka et. al., 2006). В этой работе показаны распределения плотности потока  $\text{CO}_2$  в отдельные месяцы года, характеризующие сезонные особенности региона. Необходимо отметить, что модельное положение границы ледового покрова на акватории Баренцева моря достаточно близко совпадает в условиях современного климата с положением этой границы, показанной на рисунках из работы (Nakaoka et. al., 2006). Рисунок 2 иллюстрирует распределение плотности потоков  $\text{CO}_2$  ( $\text{мол/м}^2 \text{ год}$ ) в июле и январе, полученные на основе экспериментов (рис. 2 а, в) и на основе данных РКМ+ЕСНАМ (рис. 2 б, г). Анализируемый фрагмент расчетной области включает в себя часть Баренцева моря и часть акватории Атлантического океана. Пространственное распределение расчетных потоков  $\text{CO}_2$  удовлетворительно описывается системой моделей РКМ+МГО, при этом в январе подобие модельного и экспериментального распределений оказывается большим, чем в июле. Вместе с тем в июле количественные различия в значениях модельных и экспериментальных потоков меньше, чем в январе.

Суммарный сток  $\text{CO}_2$  на акватории Баренцева моря в условиях конца XX и начала XXI веков анализировался во многих работах и результаты анализа отражены, в частности, в публикациях (Land et. al., 2007; Nakaoka et. al., 2006; Omar et. al., 2007).



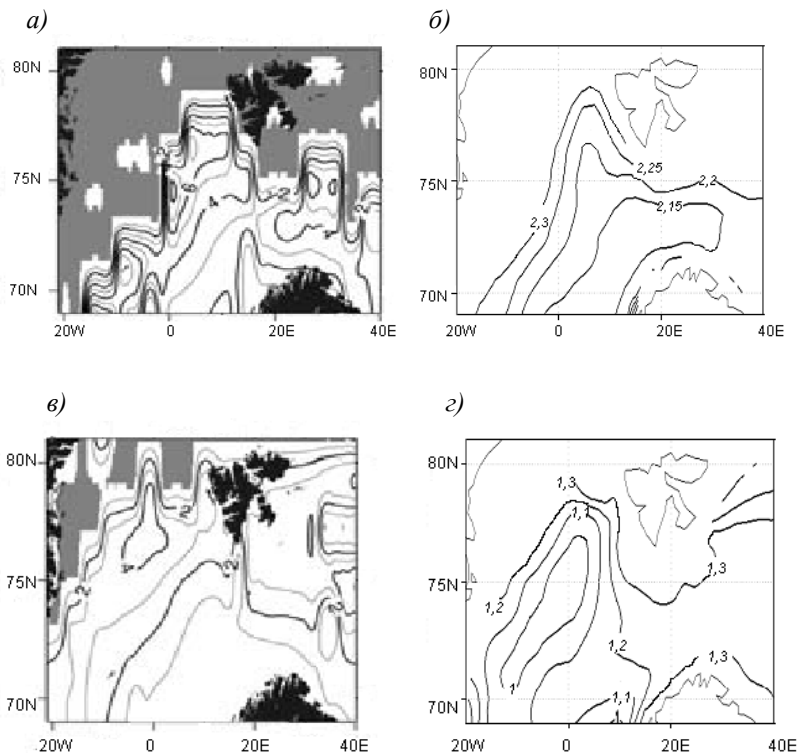


Рис. 2. Сравнение распределений плотности потока углекислого газа (моль/м<sup>2</sup> год) над западной частью акватории Баренцева моря и примыкающим к ней регионом Северной Атлантики, полученных в работе (Nakaoka et al., 2006) (а, в), и рассчитанных по модельным данным (б, г), для января (а, б) и июня (в, г).

Наиболее часто цитируемые данные приведены в таблице 1 в сравнении с расчетным значением суммарного стока, полученным на основе модели (Бортковский, 2003) с использованием климатических данных РКМ и ГКМ. Таблица показывает, что значения суммарного стока, оценивавшиеся на основе спутниковых данных по методике Ваннингофа, оказываются заметно меньше, чем значения, полученные на основе данных наблюдений, проводившихся в приводном слое, и

лучше согласуются с результатами модельных оценок настоящей работы.

Таблица 1

**Сравнение модельных значений среднегодового стока CO<sub>2</sub> (Tg C) на акватории Баренцева моря, полученных разными методами**

Модельные оценки (1981—2000 гг.)	Оценки, основанные на данных наблюдений		
	Годовой сток CO <sub>2</sub> (Tg C)	Период наблюдений (годы)	Литературный источник
<b>14</b> (на основе данных ГКМ)	70 ± 27	1992—2001	Nakaoka et. al., 2006
	77 ± 12	1990—1999	Omar et. al., 2007
	67 ± 15	1995—1997	Fransson et. al., 2011
<b>20</b> (на основе данных РКМ)	44 ± 16	1999	Kaltin et. al., 2002
	<b>24,1 ± 2,8</b>	<b>1998—2003</b>	Arrigo et. al., 2010
	<b>13 ± 6</b>	<b>2008—2009</b>	Land et. al., 2007

Примечание:

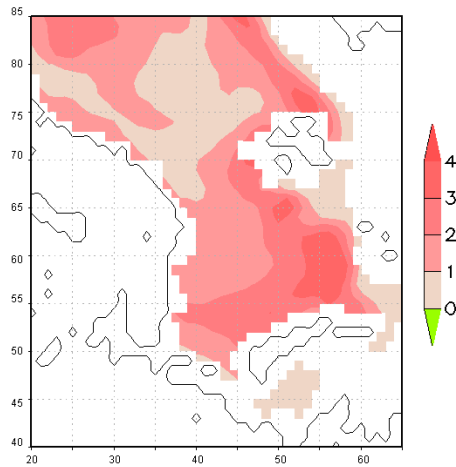
Жирным шрифтом выделены расчетные значения, полученные в настоящей работе, и значения, полученные с использованием спутниковых данных; остальные оценки основаны на данных наблюдений, проводившихся в приводном слое.

### 3. Изменение потоков CO<sub>2</sub> к середине XXI века

Оценка эволюции потоков газа через поверхность раздела «вода-воздух» в XXI в. выполнена с учетом анализа расчетных результатов, полученных за период 1981—2000 гг.

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты оценки изменений температуры поверхности и скорости ветра для зимнего сезона, которые могут произойти к середине века в случае реализации сценария A2 МГЭИК эмиссии парниковых газов.

*a)*



*б)*

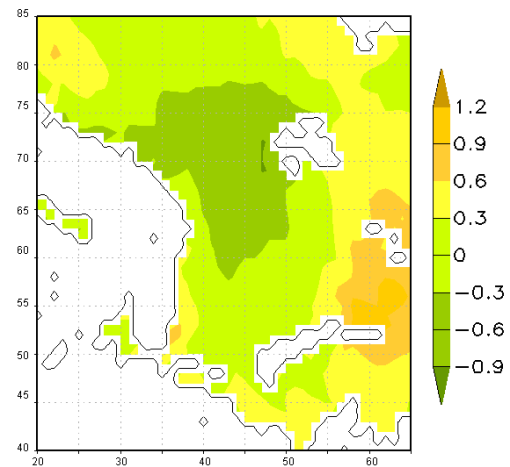


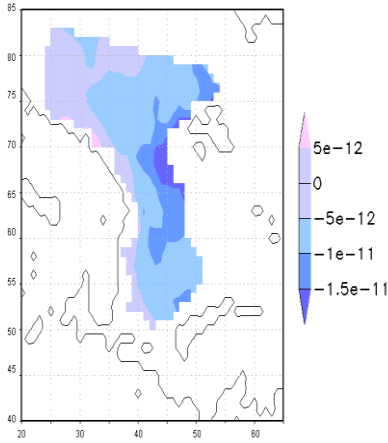
Рис. 3. Пространственные распределения изменений средних за зимний сезон температуры поверхности воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) (*a*) и скорости ветра ( $\text{м/с}$ ) (*б*), прогнозируемых к середине века, по отношению к значениям этих характеристик за период 1981—2000 гг.

Как видно на рисунке, повышение температуры поверхности моря происходит на всей акватории Баренцева моря, увеличиваясь существенно в окраинных регионах и составляя в центральных областях акватории от 1 до 2<sup>0</sup>. Для большей части акватории к середине века прогнозируется незначительное уменьшение средней за зимний сезон скорости ветра. Для летнего сезона изменения температуры существенно меньше, а изменения скорости ветра практически не отличаются от изменений, происходящих в зимний сезон. Анализ показывает, что изменения скорости ветра могут только уменьшить газоперенос, а изменение стока CO<sub>2</sub> будет определяться, главным образом, увеличением температуры поверхности, смещением границы ледового покрова и различиями концентрации CO<sub>2</sub> в воде и в воздухе. Концентрация CO<sub>2</sub> в воде рассчитывается по модели газообмена и зависит от концентрации газа в воздухе. Величина последней варьировалась в численных экспериментах для того, чтобы проследить какая концентрация CO<sub>2</sub> в воздухе обеспечит в зимнее время увеличение стока этого газа при тех изменениях температуры поверхности, которые показаны на рис. 3.

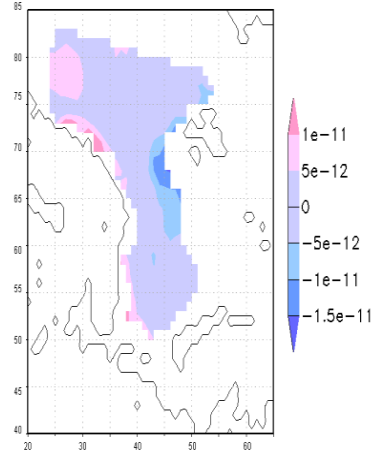
Модельные изменения суммарного стока CO<sub>2</sub> из атмосферы в воды Баренцева моря для зимнего сезона иллюстрирует рис. 4. На этом рисунке показаны отклонения потоков газа, которые приходится на середину XXI в., от значений, осредненных за период 1981—2000 гг. Отклонения потоков CO<sub>2</sub> рассчитаны для разных случаев изменения концентрации газа в атмосферном воздухе: сохранение концентрации на современном уровне, увеличение концентрации на 3 % и увеличение концентрации на 8 %. На рисунке видно, что при заданном прогнозе климатического форсинга увеличение концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе на 8 % обеспечит увеличение стока CO<sub>2</sub> на всей акватории Баренцева моря, так что различия в скорости изменения концентрации газов в воде и воздухе могут при одном и том же изменении температуры воды привести к различным результатам. При этом несмотря на повышение температуры воды, могут создаваться условия для сохранения стока CO<sub>2</sub> на прежнем уровне и даже некоторого его увеличения, результирующий поток CO<sub>2</sub> будет

определяться совместным влиянием повышения температуры воды в море и увеличением концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе.

*a)*



*б)*



*в)*

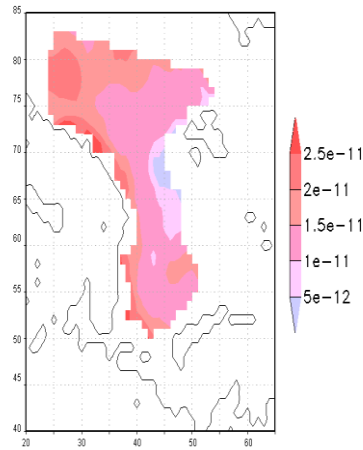


Рис. 4. Отклонения плотности потока  $\text{CO}_2$  ( $\text{г/см}^2 \text{ с}$ ), осредненной за период 2041—2060 гг., от значений этой характеристики, осредненных за период 1981—2000 гг.:

*a* — при сохранении современной концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере; *б* — при увеличении концентрации  $\text{CO}_2$  на 3 %; *в* — при увеличении концентрации  $\text{CO}_2$  на 9 %.

#### **4. Модельные оценки изменения потоков кислорода через границу «вода-воздух» на акватории Баренцева моря в XXI веке**

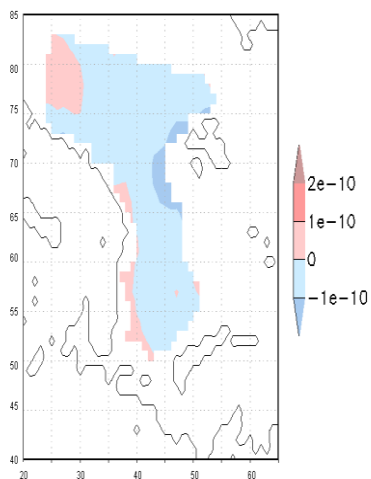
Изменения кислородного обмена на поверхности Баренцева моря имеют не меньшее значение для экологического состояния региона, чем изменения углеродного обмена. В модели газообмена предусмотрена возможность проведения оценок потоков  $O_2$  с учетом штормовых скоростей ветра и газопереноса пузырьками. В работе (Бортковский и др., 2012) было показано, что последний играет более заметную роль в переносе кислорода, чем в переносе углекислого газа. Результаты прогностических оценок показаны на рис. 5, который иллюстрирует изменения диффузионного, пузырькового и суммарного потоков кислорода в середине XXI века по отношению к величинам этих потоков за период 1981—2000 гг. На рисунке видно, что прогнозируемое уменьшение скорости ветра над акваторией уменьшит потоки кислорода, связанные с пузырьковым газообменом, над значительной частью морской поверхности, а это, в свою очередь, обусловит уменьшение суммарного потока  $O_2$ . Рисунок иллюстрирует также преобладающее влияние пузырькового газообмена на изменение потоков кислорода в условиях меняющегося климата, поскольку пространственное распределение суммарных потоков практически повторяет распределение пузырьковых потоков. Отметим, что в окраинных районах БМ потоки кислорода через поверхность «вода-воздух» к середине века могут увеличиться.

#### **Заключение**

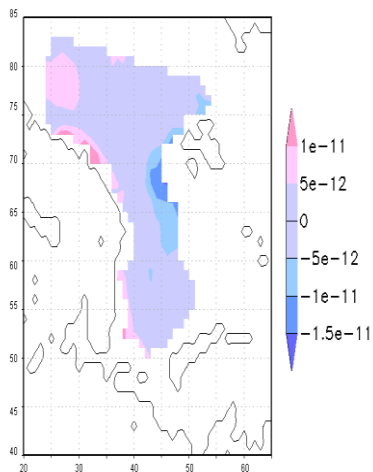
Распределение потоков углекислого газа и кислорода над акваторией Баренцева моря определяется взаимодействием термодинамических процессов, создающих условия для проявления различных механизмов газопереноса.

Анализ показывает, что сопоставление модельных оценок с оценками потоков на основе натурных наблюдений требует тщательной разработки методологии выбора входных параметров модели газопереноса в узлах пространственной регулярной сетки.

*a)*



*б)*



*в)*

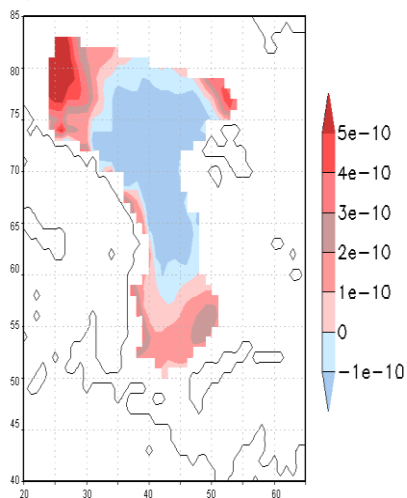


Рис. 5. Разность потоков кислорода ( $\text{г}/\text{см}^2 \text{ с}$ )  
в конце XX и в середине XXI века:  
*a* — диффузионный поток, *б* — пузырьковый поток, *в* — суммарный  
поток.

Прогностические оценки изменения газопереноса в XXI веке зависят не только от качества модели газопереноса, но и от точности задания входных параметров этой модели.

Дальнейшее развитие исследований будет связано с уточнением входных параметров МГО, разработкой вероятностного подхода к оценке изменений газообмена в XXI на основе ансамблевых модельных расчетов, модификацией расчетной схемы с учетом особенностей газопереноса в переходные сезоны.

*Авторы выражают благодарность И. М. Школьнику за предоставление расчетных данных по РКМ.*

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 13-05-00541-а, 14-05-00753-а).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бортковский Р. С. (2003). Газоперенос через поверхность океана при сильном ветре и его вклад в средний газообмен // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 39. № 6. С. 809—816.*

*Бортковский Р. С. (2006). К оценке среднего обмена кислородом и CO<sub>2</sub> между океаном и атмосферой в ключевых районах океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 42. № 2. С. 250—257.*

*Бортковский Р. С. (1983). Тепло- и влагообмен атмосферы и океана при шторме — Л.: Гидрометеониздат. 160 с.*

*Бортковский Р. С., Егоров Б. Н., Катцов В. М., Павлова Т. В. (2007). Модельные оценки среднего газообмена между океаном и атмосферой в условиях современного климата и при его изменениях, ожидаемых в 21 веке. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43. № 3. С. 313—318.*

*Бортковский Р. С., Орленко Л. Р., Надёжина Е. Д., и др. (2012). Газообмен через поверхность Баренцева моря (модельные оценки с учетом переноса газа пузырьками при шторме) // Труды ГГО. Вып. 566. С. 42—60.*

*Школьник И. М., Мелешко В. П., Павлова Т. В. (2000). Региональная гидродинамическая модель для исследования климата на территории России // Метеорология и гидрология. № 4. С. 32—49.*



*Arrigo K. R., Pabi S., G. L. van Dijken and Maslowski W.* (2010). Air-sea flux of CO<sub>2</sub> in the Arctic Ocean, 1998—2003 // *Journ. Geophys. Res.* V. 115/ G04024, doi:10.1029/2009JG001224/

*Bates N. R. and Mathis J. T.* (2009). The Arctic Ocean marine carbon cycle: evaluation of air-sea CO<sub>2</sub> exchanges, ocean acidification impacts and potential feedbacks // *Biogeosciences*. № 6. P. 2433—2459.

*Bortkovskii R. S.* (2002). Atmospheric-Ocean Gas Exchange Due to Bubbles Generated by Wind Wave Breaking. Gas Transfer at Water Surfaces — *Geophysical Monograph*. V. 127, P. 261—264.

*Furevik T., Drange H. and Sorteberg A.* (2002). Anticipated changes in the Nordic Seas marine climate: scenarios for 2020, 2050 and 2080 / *Institute of Marine Research — Bergen: Fiskerog Havet*. № 4.

*Fransson A., Chierici M., Anderson L. C., Bussmann I., Kattner G., Jones E. P. and Swift J. H.* (2001). The importance of shelf processes for the modification of chemical constituents in the waters of the Eurasian Arctic Ocean: Implication for carbon fluxes // *Cont. Shelf Res.* V. 21(3). P. 225—242.

*Gulev S. K., Josey S. A., Bourassa M., et al.* (2009). Surface energy, CO<sub>2</sub> fluxes and sea ice. / *OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*. Venice, Italy. 21—25 September.

*Kaltin S., Anderson L. G., Olsson K. et al.* (2002). Uptake of atmospheric carbon dioxide in the Barents Sea // *Journal of Marine Systems*. № 38. P. 31—45.

*Keup-Thiel E., Gottel H. and Jacob D.* (2006). Regional climate simulation for Barents Sea region // *Bor. Environ. Res.* V. 11. P. 329—339.

*Land P. E., Shutler J. D., Cowling R. D. et al.* (2007). Climate change impacts on sea-air fluxes of CO<sub>2</sub> in three Arctic seas: a sensitivity study using earth observation // *Biogeosciences Discuss.* V. 9. P. 12377—12432.

*Levitus S., Matishov G., Seidov D. and Smolyar I.* (2009). Barents Sea multidecadal variability // *Geophys. Res. Lett.* № 36. L19604, doi:10.1029/2009GL039847.

*Li-Quing Jiang, Wei-Jun Cai, Wanninkhof R. et al.* (2008). Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes on the U.S. South Atlantic Bight: Spatial and seasonal variability // *J. Geophys. Res.* V. 113. C07019, doi: 10.10292007JC004366.

*Morimoto S., Aoki S. and Yamanouchi T.* (2001). Temporal variations of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and carbon isotope ratio in Ni – Alesund, Svalbard. — «Environmental Research in the Arctic 2000», *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue* 54. P. 71—80.

*Nakaoka S., Aoki S., Nakazawa T. et al.* (2008). Variations of oceanic pCO<sub>2</sub> and air-sea CO<sub>2</sub> flux in the Greenland Sea and the Barents Sea // *V.* 8. P. 148—161.

*O'Brien K., Tompkins H., Eriksen S. and Prestrud P.* (2007). Climate vulnerability in the Barents Sea region. — *A multi-Stressor approach*. CICERO report 2004—2007. 34 p.

*Omar A. M., Johannssen T., Olsen A. et al.* (2007). Seasonal and interannual variability of air-sea CO<sub>2</sub> flux in the Atlantic sector of the Barents Sea // *Marine Chemistry*. №104. P. 200—213.

*Petoukhov V. and Semenov V.* (2010). A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res.* V 115. D21111, 11 pp., doi: 10.1029/2009JD013568.

*Smedsrud L. H., Ingvaldsen R., Nilsen J. E. O. and Skagseth O.* (2010). Heat in the Barents Sea: transport, storage, and surface fluxes // *Ocean Science*. № 6. P. 219—234.

*Stanley R. H. R., Jenkins W. J., Lott D. E. and Doney S. C.* (2009). Noble gas constraints on air-sea gas exchange and bubble fluxes // *J. Geophys. Res.* V. 114. C11020, doi: 10.1029/2009JC005396.

Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea August-October 2009 (adopted vol.). IMR/PINRO Joint Report Series. № 2/2010. ISSN 1502—8828. 118 p.

*Wanninkhof R., Asher W. E., Ho D. T. et al.* (2009). Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing // *Marine Science*. V. 1. P. 213—244.

*Woolf D. K., Leifer I. S., Nightingale P. D., Bowyer et al.* (2007). Modelling of bubble-mediated gas transfer fundamental principles and a laboratory test // *J. Mar. Sys.* 5. V. 66. P. 71—91.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ КАМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ МЕТАНА НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «ТИКСИ»

*В. М. Ивахов<sup>1</sup>, И. Л. Кароль<sup>1,2</sup>, А. А. Киселев<sup>1</sup>, А. В. Зинченко<sup>1</sup>,  
Н. Н. Парамонова<sup>1</sup>, В. И. Привалов<sup>1</sup>, Т. Лаурилла<sup>3</sup>, М. Аурела<sup>3</sup>*

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

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>3</sup>Финский метеорологический институт, Хельсинки, Финляндия  
E-mail: viktor.ivakhov@voeikovmgo.ru

Поступила в редакцию: 25.11.2014  
Поступила после доработки 20.01.2015

### Введение

Метан (СН<sub>4</sub>) является одним из важнейших парниковых газов: его вклад в глобальное потепление второй после вклада СО<sub>2</sub> (IPCC, 2013). Измерения показывают, что начиная с доиндустриального периода, концентрация метана выросла примерно на 150 %, в то время как концентрация СО<sub>2</sub> лишь на 40 %. При этом молекула СН<sub>4</sub> «работает» на глобальное потепление значительно эффективнее молекулы углекислого газа: потенциал глобального потепления СН<sub>4</sub> в краткосрочной перспективе в 72, а в среднесрочной в 25 раз выше, чем у СО<sub>2</sub> (МГЭИК, 2007).

Согласно докладу МГЭИК (2007) общая среднегодовая глобальная эмиссия СН<sub>4</sub> в среднем составляет 582 Мт с разбросом оценок 503—610 Мт, при этом чуть более 1/3 его эмиссии принадлежит естественным источникам и чуть менее 2/3 — антропогенным. Общий выброс СН<sub>4</sub> с переувлажненных территорий России оценивается примерно в 21 Мт/год (Киселев, Кароль, 2003, 2005).

Основные естественные источники связаны с потоками  $\text{CH}_4$  с поверхности заболоченных территорий и пресноводных водоемов, океанической поверхности, а также с метаном, образующимся в колониях термитов и выделяемым при сжигании биомассы в результате пожаров. С антропогенной деятельностью связаны потоки метана в атмосферу при добыче ископаемого топлива, захоронении бытовых отходов и мусора на свалках, очистке сточных вод, расширении сельскохозяйственных угодий (рисовых плантаций), разведении крупного рогатого скота и др. Существенная неопределенность в оценках интенсивности потоков метана в атмосферу обусловлена разнородностью его источников.

Как величина эмиссии  $\text{CH}_4$ , так и ее знак зависят от типа подстилающей поверхности. В ряде ситуаций наблюдается сток метана в почву. В частности, установлено, что поглощение метана сухими почвами происходит более интенсивно, нежели влажными. При глобальном стоке метана, оцениваемом в  $540 \pm 56$  Мт  $\text{CH}_4$ /год (Prather et al., 2012), сток  $\text{CH}_4$  в почву составляет 15—45 Мт  $\text{CH}_4$ /год (King and Adamsen, 1992; Dörr et al., 1993; Dutaur and Verchot, 2007). Последние публикации позволили несколько сократить неопределенность такого стока до 25—40 Мт  $\text{CH}_4$ /год (Curry, 2007; Spahni et al., 2011), но погрешность по-прежнему велика.

Высокая степень неопределенности в оценке эмиссии метана обусловлена многими факторами, в том числе: какой тип почвы был в регионе до последнего ледникового периода (торф, суглинки и т.д.), каковы эффективность деятельности восстанавливающих метан из углерода анаэробных бактерий, уровень грунтовых вод и температура активного слоя почвы над слоем мерзлоты и др. Как следствие, сегодня нет как достаточного объема экспериментальной информации, так и основанных на ней комплексных теоретических исследований. Инвентаризация потоков метана в атмосферу (как в глобальном масштабе, так и с территории России) была и остается актуальной задачей, требующей дальнейших комплексных усилий для ее решения.

В данной работе представлены первые результаты камерных измерений потоков метана в районе гидрометеорологической

обсерватории «Тикси» (71°5′ с. ш., 128°9′ в. д.), расположенной в зоне вечной мерзлоты. Также приведены измеренные синхронно температуры на различных глубинах протаивания почвы. Эти результаты получены в ходе трех краткосрочных экспедиций на ГМО «Тикси», проведенных в 2013—2014 гг.

### **Основные факторы, определяющие интенсивность эмиссии метана**

Основными механизмами переноса метана из почвы в атмосферу являются: диффузия газа через заполненные водой или воздухом поры грунта; всплытие образующихся на дне затопленных участков почвы пузырьков биогаза, перенос газа стеблями растений. В близких к стационарным условиям (в середине лета) эмиссия метана из заболоченной почвы в атмосферу определяется балансом процессов образования метана в анаэробных условиях метанообразующими микроорганизмами (метаногенами) и его окисления аэробными микроорганизмами (метанотрофами). Выход метана в атмосферу обусловлен неспособностью метанотрофов, образующих бактериальный фильтр, перехватить и окислить весь выделяющийся из анаэробной зоны метан. В переходные сезоны может наблюдаться дисбаланс между образованием/окислением метана и его выходом в атмосферу: экспериментально обнаружено, что весной при оттаивании почвы эмиссия метана возрастает за счет выхода газа, аккумулированного в слое почвы с осени прошлого года (Neuer et al., 2002). В практике расчетов потоков метана для целей моделирования климата обычно применяются эмпирические формулы (параметризации), см., например, (Надежина и др., 2011; Пикалева, 2011).

Анализ литературных источников (Калюжный, Лавров, 2012; Neuer et al., 2002; Rinne et al., 2007 и др.) позволил предложить параметризационную формулу для расчета плотности потока метана из увлажненной почвы ( $E$ ):

$$E = E_0 Q_{10}^{\frac{T-\bar{T}}{10}} \exp\left(-\frac{D}{D_0}\right) \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,5} \quad (1)$$

где  $T$  — температура почвы на выбранной глубине, °С,  $\bar{T}$  — среднесезонная температура почвы на этой глубине,  $D$  — глубина уровня грунтовых вод,  $h$  — глубина уровня протаивания (изотерма 0°С).

Плотность потока метана  $E$  зависит от трех переменных  $T$ ,  $D$ ,  $h$  и от четырех параметров:  $E_0$ ,  $Q_{10}$ ,  $D_0$ ,  $h_0$ . Параметр  $Q_{10}$  определяет относительное изменение потока метана при изменении температуры почвы на 10 °С,  $E_0$  — значение  $E$  при  $T=\bar{T}$ ,  $D=0$ ,  $h=h_0$ ,  $D_0$  — уровень грунтовых вод, при котором  $E$  уменьшается в  $e$  раз по сравнению с условием  $D = 0$ ;  $h_0$  определяет влияние глубины промерзания на величину  $E$ .

Значения параметров формулы (1) определяются по данным измерений потоков метана для разных территорий. Очевидно, в природе плотность потока метана зависит также и от других факторов (например, от плохо поддающегося количественному определению характера растительного покрова). Поэтому необходима предварительная валидация параметризации (1) для каждого из рассматриваемых видов грунта, и, возможно, использование различных наборов параметров в зависимости от типа поверхности.

Особый интерес представляет изучение влияния глубины протаивания почвы на эмиссию метана. Максимальную глубину протаивания за сезон называют мощностью сезонно-талого слоя. Средняя мощность сезонно-талого слоя для станции Тикси равна 45 см при межгодовой дисперсии 13 см (Методы оценки..., 2012). Данные циркумполярной базы данных CALM для Сибири указывают на положительный тренд мощности сезонно-талого слоя порядка 1—2 см/год (Методы оценки..., 2012). Между глубиной протаивания и интенсивностью эмиссии метана наблюдается положительная корреляция. При положительном тренде эмиссии метана в районах вечной мерзлоты может иметь место эффект положительной обратной связи для изменений климата. Некоторые климатологи опасаются, что

таяние вечной мерзлоты в арктической тундре приведет к выстрелу «метанового ружья»: массовым выбросам этого газа в атмосферу.

### **Методы и результаты измерений**

В 2013—2014 гг. в районе гидрометеорологической обсерватории «Тикси» (павильон «Чистый воздух») были проведены три полевых кампании по исследованию потоков метана с различных типов подстилающей поверхности тундры (5—7 июля и 22 августа — 3 сентября 2013 г., 13—18 июня 2014 г.). Периоды проведения исследований были выбраны с таким расчетом, чтобы охватить начало, середину и конец теплого периода в районе станции. Измерения потоков метана из почвы проводились методом накопления в камере, состоящей из двух частей: непосредственно самой камеры из оргстекла размером  $0,5 \times 0,5 \times 0,25$  м и металлического основания из нержавеющей стали аналогичного размера. На время экспозиции прозрачная камера устанавливалась в двухсантиметровый желоб на внешнем верхнем крае основания, которое, в свою очередь, было вкопано в землю. За счет воды в желобе исключался газообмен между камерой и атмосферой. Пробы воздуха из камеры отбирались шприцем с объемом 250 мл через штуцер. За две минуты до отбора пробы в камере включался вентилятор для выравнивания концентрации метана. Из шприца проба перекачивалась в стеклянный пузырек объемом 50 мл с резиновой септой. Предполагалось, что пятикратного продува объема пузырька достаточно для полного замещения воздуха пузырька воздухом пробы. Как правило, время экспозиции составляло 26 мин, в течение которого отбиралось четыре пробы: первая — через две минуты с начала экспозиции, три последующих — через 8 минут каждая. Измерение концентрации метана в пробах проводилось в ГГО на газовом хроматографе ЦВЕТ 500-М (см. подробное описание в работе Сметанина Г. Н. и др., 2000). Каждое измерение сопровождалось калибровкой с помощью стандартных газовых смесей со шкалой NOAA2004. В 2014 г. наряду с отбором проб воздуха в пузырьки, появилась возможность непрерывных измерения концентрации

метана в камере при помощи лазерного газоанализатора DLT-100 фирмы LGR (<http://www.kagaku.com/turbo/gas/ch4.pdf>). Камеру и газоанализатор соединяли две ПВХ трубки с внутренним диаметром 4 мм и длиной 30 м. Непрерывные измерения проводились в период 16—18 июня 2014 года. Концентрация метана в камере измерялась в непрерывном режиме с частотой 1 Гц.

Параллельно с измерениями потоков в том же месте проводились непрерывные измерения температуры почвы на глубинах 0, 2, 5, 10, 20, 30, 40 см с помощью датчиков PT100 фирмы Nokeval Oy.

Потоки метана с подстилающей поверхности в камере рассчитывались по коэффициенту  $b$  из уравнения линейной регрессии концентрации метана в камере от времени  $t$ :

$$C = a + bt \quad (2)$$

$$E = b \times H$$

где  $H$  — высота накопительной части камеры.

Измерения осуществлялись на 13 микроландшафтных участках (на территории порядка 1 Га), которые соответствовали трем типам грунта: сухая тундра с почвенным и растительным покровом, увлажненная тундра с почвенным и растительным покровом и каменистые участки тундры. Участки для проведения измерений были выбраны таким образом, чтобы по возможности максимально охватить разнообразие микроландшафтов на исследуемой территории. Схема их расположения представлена на рис. 1. Как показали результаты измерений, основными критериями, по которым различаются типы подстилающей поверхности тундры с точки зрения наличия/отсутствия потоков метана, являются степень увлажненности участка и наличие органического вещества.

На рис. 2 представлены примеры изменения концентрации метана в камере на различных типах подстилающей поверхности тундры, полученные с помощью автоматического газоанализатора. Границы отображаемых кривых соответствуют времени, когда камера переставлялась с одного основания на другое.



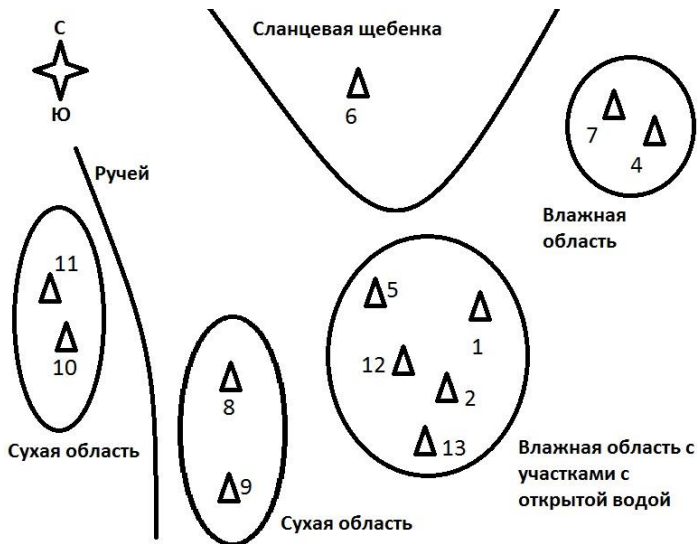


Рис.1. Схема расположения мест (треугольники), где проводились камерные измерения потоков метана в 2013—2014 гг. Территория проведения измерений находится в 300 м к югу от павильона «Чистый воздух» ГМО «Тикси».

Для расчета коэффициентов линейной регрессии брались наиболее прямолинейные участки кривых (граничные участки не учитывались).

В случае с кривой Г можно видеть в действии пузырьковый механизм переноса метана со дна затопленного участка в атмосферу. После выхода пузырька с метаном в камере резко увеличивается концентрация, которая затем постепенно приходит в равновесие. Как видно из рисунка, за время экспозиции было четыре всплеска концентрации, которые сопровождалось параллельным сдвигом кривой. Подобное явление практически невозможно зафиксировать камерными измерениями потоков метана при помощи отбора проб шприцами. С помощью высокочастотных автоматических измерений становится возможным детальное изучение пузырькового механизма переноса метана со дна затопленных территорий в атмосферу.

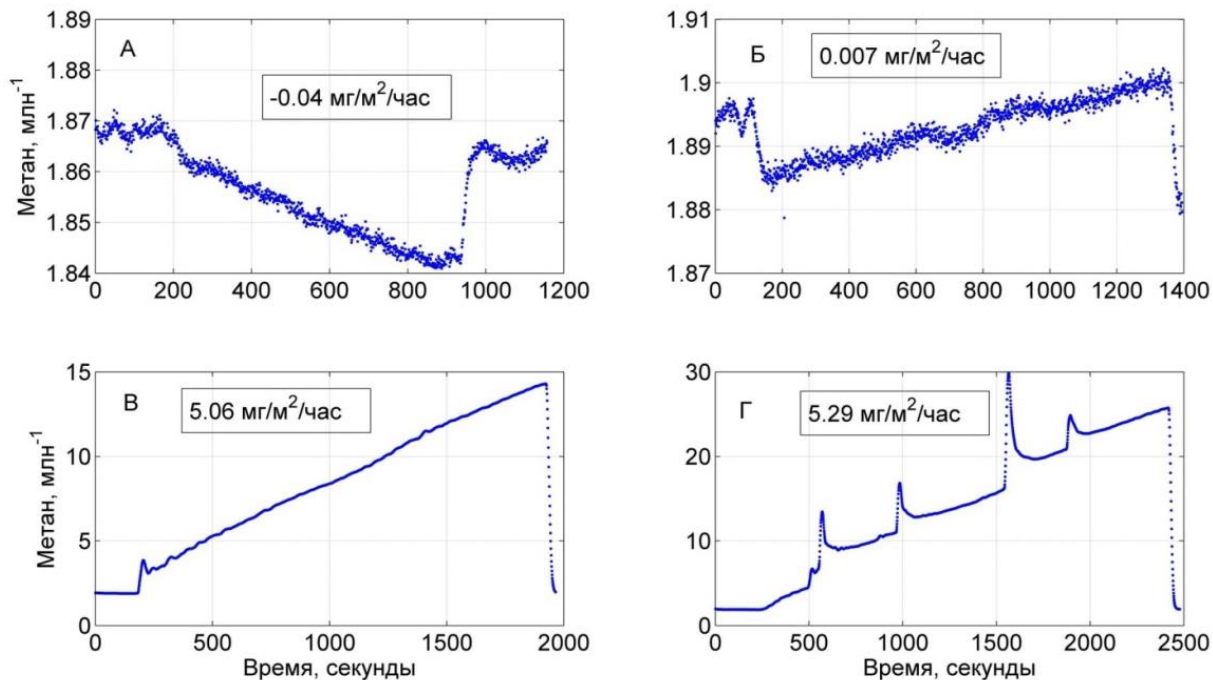


Рис.2. Изменение концентрации метана в камере во время эксперимента.

*А* — поглощение метана на участке со сланцевой щебенкой (эксперимент проводился 16.06.2014);  
*Б* — слабая эмиссия на сухом участке с растительным покровом (16.06.2014); *В, Г* — эмиссия на участках с открытой водой и растительностью (оба — 17.06.2014).

Во врезках указаны рассчитанные для данного случая значения плотности потоков метана.

Непрерывные измерения плотности потока метана позволяют получить более надежные результаты, нежели в случае с дискретным отбором проб воздуха. Это, в первую очередь, достигается за счет проточной системы измерений, которая позволяет избежать ошибок, связанных с нарушением давления в камере, создаваемым при отборе пробы шприцем. Разница давления внутри и снаружи камеры выравнивается в результате усиления потока воздуха, содержащегося в порах почвы, а также за счет наружного воздуха, попадающего в камеру через компенсационное отверстие. Непрерывные измерения дают возможность учитывать пузырьковый механизм при расчетах потока.

В табл. 1 приведены данные о плотности потока метана с некоторых участков, полученные с помощью лазерного газоанализатора. Во всех случаях с непрерывными измерениями коэффициент детерминации был не меньше 0,8.

В табл. 2 приведены осредненные результаты измерений плотности потоков метана с трех различных типов подстилающей поверхности, полученные в течение трех полевых измерительных кампаний. Стоит отметить, что все измерения на участке со сланцевой щебенкой показали отчетливый сток метана. На сухих участках тундры зафиксированы как положительные значения, так и отрицательные близкие к нулю значения потока  $\text{CH}_4$ . Увлажненные области представляют собой грядово-мочажинную микрорельефную систему, в которой на мочажинных (наиболее увлажненных) участках наблюдалась наибольшая плотность потока — до  $5,76 \text{ мг/м}^2/\text{час}$ , а на грядовых участках (возвышения над окружающим микрорельефом) потоки были сравнимы с потоком на сухих участках.

Как видно из табл. 3, в июне и июле почва прогрелась до глубины порядка 10 см, максимум же глубины протаивания наблюдался в конце августа — начале сентября, когда почва прогрелась до 40 см.

Таблица 1

**Результаты измерений плотности потоков метана (ППМ) газоанализатором DLT-100  
16—18 июня 2014 года**

№ участка	ППМ, мг/м <sup>2</sup> /час					Среднее	Среднее квадратическое отклонение	Тип участка
	№ серии измерений							
	1	2	3	4	5			
1	5,70	5,76	3,64	4,06	—	4,79	1,10	Влажный
2	0,10	0,18	0,03	0,05	—	0,09	0,07	Сухой
3	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	Сухой
4	0,00	0,00	0,00	0,00	—	0,00	0,00	Сухой
5	2,45	2,43	3,10	3,05	—	2,76	0,36	Влажный
6	-0,04	-0,06	-0,16	-0,09	—	-0,09	0,05	Каменистый
7	0,09	0,09	0,10	0,10	—	0,10	0,01	Сухой
12	5,06	4,49	4,21	4,30	—	4,52	0,38	Влажный
13	4,78	5,29	5,02	5,48	—	5,14	0,31	Влажный

Таблица 2

**Потоки метана (ПМ) на участках тундры с различной подстиляющей поверхностью,  
полученные в ходе трех экспедиций**

Тип подстиляющей поверхности тундры	Количество мест измерений (номера участков)	Количество измерений	ПМ, мг/м <sup>2</sup> /час		
			Средний	Минимальный	Максимальный
Сухие участки с растительным покровом.	5 (№№ 3,8,9,10,11)	30	0,01±0,06	-0,07	0,33
Влажные участки с растительным покровом и участки с открытой водной поверхностью.	2 (№№ 2,4) (гряда)	16	0,03±0,05	-0,02	0,18
	5 (№№ 1,5,7,12,13) (мочажина)	37	2,35±2,12	-0,01	5,76
Каменистые участки (сланцевая щебенка).	1 (№ 6)	7	-0,07±0,05	-0,16	-0,03

Изучение связей между температурой почвы на разных уровнях и потоком метана не выявило статистически значимых закономерностей. Это может быть обусловлено небольшим количеством измерений и малой величиной изменения температуры в деятельном слое почвы.

Таблица 3

**Средние температуры почвы на разных глубинах в периоды измерительных кампаний**

Период измерений	Температура почвы, на разных глубинах, °С		
	2 см	5 см	10 см
Июнь	2,7	1,1	-0,3
Июль	2,8	1,8	0,3
Август-сентябрь	3,8	3,0	2,1

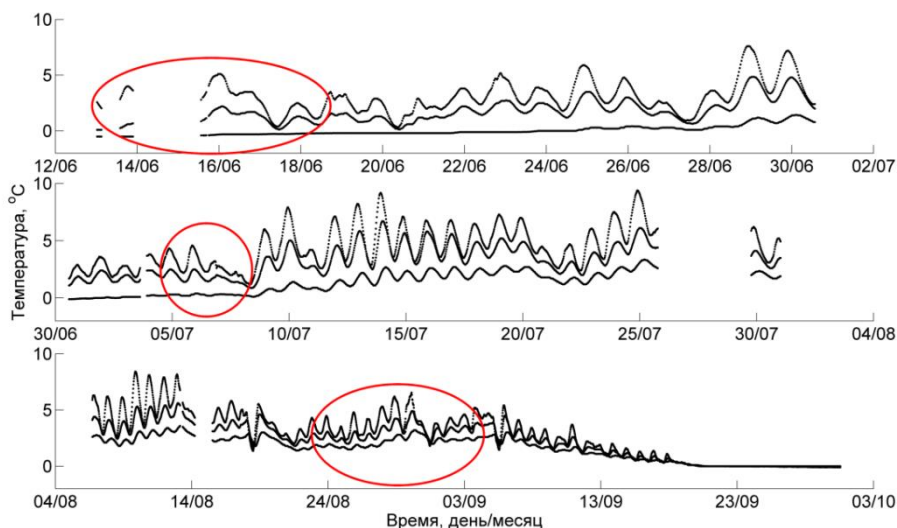


Рис. 3. Температура почвы на разных глубинах. Овалами обозначены периоды измерений потоков метана.

На рис. 3 представлены результаты измерений температуры почвы на глубине 2, 5, 10 см. Амплитуда колебаний на глубине 2 см достигала порядка 2 °С, что незначительным образом сказывалось на изменении потока метана.

### **Заключение**

В статье представлены первые результаты измерений потоков метана с различных типов грунта, имеющих место в окрестности гидрометеорологической обсерватории «Тикси». На сегодняшний день архив подобных результатов очень скуден, поэтому практически невозможно провести сколь-нибудь полное их сравнение с аналогичными данными измерений других исследователей. Тем не менее, можно отметить, что приведенные в табл. 1 значения потоков метана для различных типов грунтов хорошо согласуются с данными из работы (Schneider et al., 2009), полученными в ходе нескольких исследований в районе дельты Лены. Так, для сухих участков с растительным и почвенным покровом в дельте Лены, среднее значение эмиссии метана за сутки составило 0,4 мг/м<sup>2</sup>/день (или 0,017 мг/м<sup>2</sup>/час). Для влажных участков были получены следующие значения эмиссии метана: 2,43 (дельта Лены) и 2,35±2,12 мг/м<sup>2</sup>/час («Тикси»). Отрицательных потоков СН<sub>4</sub>, как в случае с участками со сланцевой щебенкой, в работе (Schneider et al., 2009) зафиксировано не было.

Необходимо дальнейшее пополнение базы данных измерений потоков метана с учетом особенностей эволюции вечномерзлых грунтов. Это важно как для увеличения репрезентативности полученных результатов, так и для последующего совершенствования методов оценки выбросов СН<sub>4</sub> с больших территорий, а также лучшей инвентаризации таких выбросов. В этой связи целесообразно дальнейшее развитие математических подходов, позволяющих восстанавливать потоки метана с разных видов почв как функции параметров, характеризующих текущее состояние вечномерзлых грунтов. Построение такой параметризованной зависимости (типа уравнения (1) по представленным данным измерений затрудняется

тем, что факторы, влияющие на эмиссию, взаимосвязаны и изменяются одновременно. В связи с этим предполагается проведение активного эксперимента, с управлением температурным и влажностным режимом почвы, который позволит выявить степень влияния отдельных факторов на величину высвобождаемого из грунта метана.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-05-00677а).*

*Авторы выражают благодарность Европейскому Союзу за оказанную поддержку для проведения измерений потоков метана в Тикси в рамках проекта FP7-ENVIRONMENT PAGE21, контракт №GA282700.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Калужный И. Л., Лавров С. А. (2012). Гидрофизические процессы на водосборе // СПб: Нестор-История. 615 с.*

*Киселев А. А., Кароль И. Л. (2003). Отклик газового состава тропосферы северных умеренных широт на возможный прорыв метана из недр земли в атмосферу // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 39. № 5. С. 579—588.*

*Киселев А. А., Кароль И. Л. (2005). Возможные последствия высвобождения метана из толщи вечной мерзлоты на территории России / В сб.: Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии (под ред. Г.В. Менжулина) — СПб: Наука. С. 102—113.*

*МГЭИК (2007). Отчет Межправительственной группы Экспертов по Изменениям Климата, [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_ru.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf).*

*Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем (2012). // Коллективная монография. Глава 8. М.: Росгидромет. С 301.*

*Надежина Е. Д., Молькентин Е. К., Киселев А. А., Семюшина А. А. Школьник И. М. (2011). Исследование влияния параметризации в задаче оценки потоков метана по данным региональной модели ГГО для территории России.// Метеорология и гидрология. № 6. С. 26—41.*



*Пикалева А. А.* (2011). Модельные оценки влияния режима увлажнения почвы на эволюцию эмиссии метана с территории избыточного увлажнения в Сибири // Труды ГГО. Вып. 564. С. 66—68.

*Сметанин Г. Н., Привалов В. И., Решетников А. И., Парамонова Н. Н.* (2000). Газохроматографическая установка для прецизионных измерений концентрации метана в атмосфере на фоновом уровне // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Прикладная метеорология. Вып. 2 (548). С. 121—130.

*Curry C. L.* (2007). Modeling the soil consumption of atmospheric methane at the global scale // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 21. GB4012, doi:10.1029/2006GB002818.

*Dörr H., Katruff L., Levin I.* (1993). Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils // *Chemosphere*. V. 26. № 1—4. P. 697—713.

*Dutaur L., Verchot L. V.* (2007). A global inventory of the soil CH<sub>4</sub> sink // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 21. GB4013. DOI:10.1029/2006GB002734.

*Heyer J., Berger U., Kuzin I.L., Yakovlev O. N.* (2002). Methane emissions from different ecosystem structures of the subarctic tundra in Western Siberia during midsummer and during the thawing period // *Tellus*, V. 54B, PP. 231—249.

*IPCC* (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 p. [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf).

*King G.M., Adamsen A.P.S.* (1992). Effects of Temperature on Methane Consumption in a Forest Soil and in Pure Cultures of the Methanotroph *Methylobacterium rubra* // *Applied and Environmental Microbiology*. V. 58. № 9. P. 2758—2763.

*Prather M. J., Holmes C. D., Hsu J.* (2012). Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry // *Geophysical Research Letters*. V. 39. L09803. doi:10.1029/2012GL051440.

*Rinne J., Riutta T., Pihlatie M., Aurela M., Haapanala S., Tuovinen J.-P., Tuittila E.-S., Vesala T.* (2007). Annual cycle of methane emissions from a boreal fen measured by eddy covariance technique // *Tellus*. V. 59B. P. 449—457.

*Schneider J., Grosse G., Wagner D.* (2009). Land cover classification of tundra environments in the Arctic Lena Delta based on Landsat 7 ETM+ data and its application for upscaling of methane emission // *Remote sensing of Environment*. V. 113. P. 380—391.

*Spahni R., Wania R., Neef L., van Weele M., Pison L., Bousquet P., Frankenberg C., Foster P. N., Joos F., Prentice I.C., van Velthoven P.* (2011). Constraining global methane emissions and uptake by ecosystems // *Biogeosciences*, V. 8. P. 1643—1665. doi:10.5194/bg-8-1643-2011.

## **О ВЛИЯНИИ АЭРОЗОЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ**

*А. А. Синькевич<sup>1</sup>, С. Д. Павар<sup>2</sup>, А. Б. Куров<sup>1</sup>, Н. Н. Волков<sup>1</sup>,  
В. Ю. Михайловский<sup>3</sup>, Н. Е. Веремей<sup>1</sup>, В. Гоналакришнан<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.

<sup>2</sup> Indian Institute of Tropical Meteorology  
Dr. Homi Bhabha Road, Pashan, Pune - 411008 India

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, МРЦ  
«Нанотехнологии»  
198504, Санкт-Петербург, Петергоф, Ульяновская ул., 1.  
E-mail: sinkevich51@mail.ru

Поступила в редакцию 20.11.2014

Поступила после доработки 26.01.2015

Поверхность Земли является источником большого количества аэрозолей, поступающего в атмосферу во время пыльных бурь, пожаров, извержении вулканов и т. п. В связи с этим научный интерес представляет изучение влияния таких аэрозолей на микроструктуру облаков, а также на динамические процессы, происходящие внутри самих облаков (Довгалок, Ивлев, 1998; Зуев, Кабанов, 1987; Askerman, 2000; Seifert et. al., 2010).

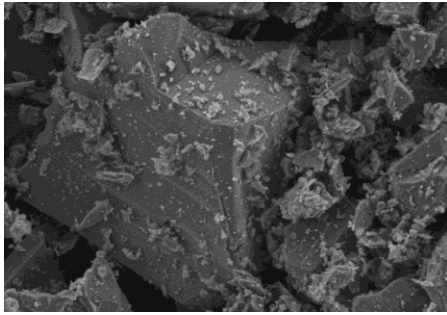
Изучением вопроса влияния аэрозолей на микроструктуру облаков, количество выпадающих осадков, грозовую активность занимались многие исследователи в нашей стране и за рубежом. Степень влияния аэрозольных частиц на облачную среду зависит от их концентрации, спектра размеров, химических свойств и т. д. (Hoose, Mohler, 2012; Rosenfeld, Givati, 2006; Twohy, Poellot, 2005; Warner, Twomey, 1967).

В настоящей статье рассматривается вопрос об изменении температуры кристаллизации капель воды при попадании в них

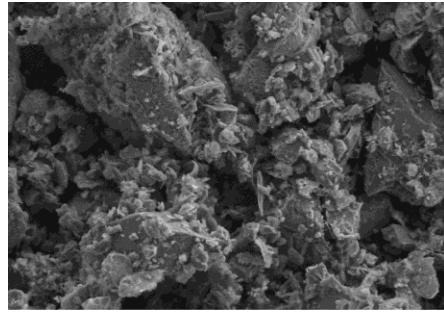
аэрозольных частиц естественного происхождения (иммерсионное замерзание). Работа является продолжением исследований, представленных в статье А. А. Синькевича с соавторами (2014), где рассматривалось влияние частиц песка и глины, образцы которых были собраны на территории Ленинградской области, на кристаллизацию облачных капель. Настоящая статья посвящена исследованию образцов песка и глины, пробы которых были собраны в Индии, а также частиц сажи.

Как известно, от формы частиц существенно зависит льдообразующая активность частиц реагентов (Каменцев, 1983). Снимки образцов песка и глины (рис. 1), сделанные при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) Zeiss Merlin, позволяют установить особенности структуры и состава образцов. Исследуемые образцы обладают как видовыми характеристиками, так и характеристиками, относящимися к месту их происхождения.

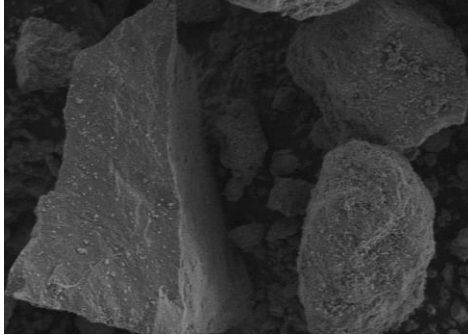
Для образцов песка из Индии и ранее рассмотренных образцов с территории Ленинградской области характерно наличие цельных кристаллических частичек с острыми гранями, частички песка в целом крупнее частиц глины и распределение их по размерам более узкое, нежели у образцов глины. В то же время между анализируемыми образцами песка из двух различных географических регионов существуют отличия, касающиеся структуры и гранулометрического состава. В образце песка с территории Ленинградской области размеры частичек распределены в трех узких интервалах 0,4—0,6 мкм, 8—12 мкм, 50—70 мкм, частицы образца песка из Индии делятся на две группы: мелкие с размерами частиц 2—10 мкм, и крупные с размерами 50—120 мкм. Небольшие частицы в образце песка из Индии в основном представляют собой конгломераты более мелких частичек (150—200 нм) округлых форм, в образце песка из России мелкие частицы в основном являются цельными и имеют острые кристаллические грани. Крупные частицы песка из обеих проб по своей структуре практически идентичны друг другу.



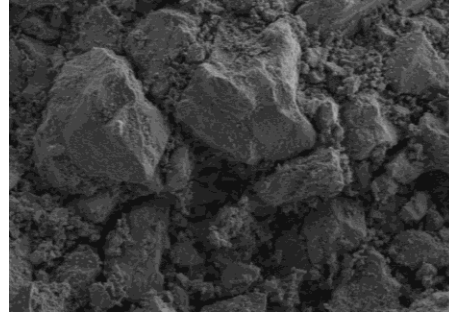
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 1. Снимки образцов песка и глины, сделанные при помощи электронного микроскопа :  
*a* — образец песка с территории Ленинградской области, *б* — образец глины с территории Ленинградской области, *в* — образец песка из Индии, *г* — образец глины из Индии.

Частицы глины из обеих проб весьма схожи как по размерам, так и по структуре, однако для образца глины из Индии характерно присутствие большого количества мелких частичек (150—200 нм) округлых форм, покрывающих поверхность крупных и заполняющих промежутки между ними.

Рентгеноэлементный анализ частиц песка и глины, выполненный методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием оборудования Oxford Instruments Inca X-ACT, показывает, что они имеют сходный элементный состав (см. табл. 1). Образцы содержат следующие элементы: кремний, кислород, алюминий, углерод, а также примеси натрия, калия и магния. Для образцов, взятых в Индии, характерно большее содержание металлов по отношению к кремнию, чем для рассмотренных ранее образцов, а также наличие железа. Присутствие достаточно большого количества алюминия в обоих образцах свидетельствует об их естественном происхождении.

Таблица 1

Элементный состав образцов песка и глины, собранных на территории Ленинградской области и в Индии

Происхождение образца	Концентрация, ат. %							
	C	Si	O	Al	Na	K	Mg	Fe
<i>Песок</i>								
Индия	8,2	16,5	60,2	8,3			1,3	5,5
Ленинградская обл.		31,5	65,0	3,5				
<i>Глина</i>								
Индия	6,8	19,3	59,5	4,2	1,8		2,6	4,8
Ленинградская обл.	6,1	22,8	62,4	6,4	0,7	1,6		

Для частиц сажи характерна развитая, неровная поверхность. Анализ состава этих частиц показал, что они приблизительно на 60 % состоят из углерода, 35 % — кислорода и небольшого количества

примесей: в основном кремния, а также магния, натрия и алюминия.

Лабораторные исследования проводились с применением малой холодильной камеры «Капля» (Довгалюк, 2008), внутри которой на синтетической нити подвешивалась исследуемая капля водной суспензии и контрольная капля дистиллированной воды. В процессе охлаждения фиксировалась температура воздуха в зоне подвеса капель, что позволяло определить момент начала кристаллизации по импульсу температуры, появляющемуся при выделении скрытой теплоты кристаллизации. Кроме этого, осуществлялась видеосъемка исследуемых капель, позволяющая детально изучать процессы, происходящие при замерзании капель. В ходе проведения экспериментов использовались капли одинакового размера — около 1 мм в диаметре.

В данном исследовании в отличие от эксперимента, описанного в работе А. А. Синькевича и др. (2014), были уменьшены концентрации исследуемых веществ в каплях суспензий. Массовая концентрация частиц песка, глины и сажи в каплях дистиллированной воды в проведённых экспериментах составляла 0,5 %; 0,3 %; 0,1 %; 0,08 %; 0,05 % и 0,03 %. Результаты исследований представлены на рис. 2.

Максимальная температура кристаллизации наблюдалась у капли водной суспензии сажи при концентрации 0,5 масс.% и составила  $-3,4$  °С. Минимальная температура кристаллизации аналогичной капли при той же концентрации составила  $-12,9$  °С. Столь большой разброс температур при одинаковой концентрации, вероятно, связан с разнообразием форм частиц сажи в исследуемых образцах.

Как и в предыдущей работе, зависимость температуры кристаллизации капель водной суспензии от концентрации частиц носит тот же характер — наблюдается рост температуры с увеличением количества вещества в капле. При низких концентрациях температура кристаллизации капель суспензии по экспериментальным данным приближается к температуре кристаллизации капли чистой дистиллированной воды, которая в среднем составляет  $-14,6$  °С.

Линейная аппроксимация данных температуры кристаллизации капель водной суспензии песка и сажи наглядно это иллюстрирует.

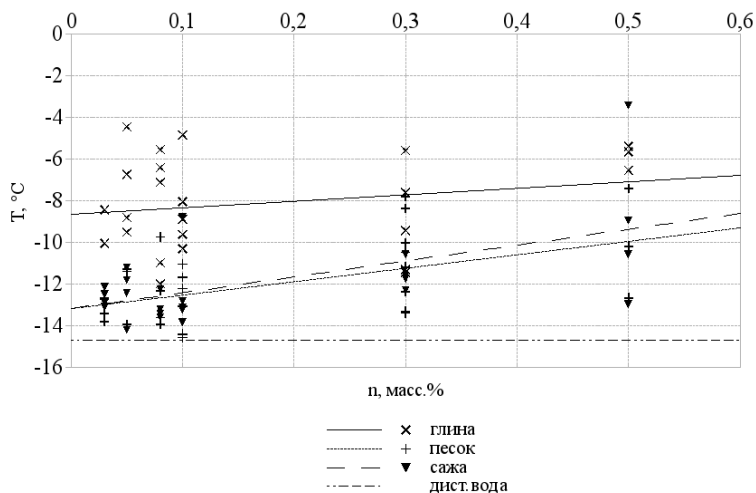


Рис. 2. Зависимость температуры кристаллизации капель водной суспензии глины, песка и сажи от массовой концентрации.

Зависимость температуры кристаллизации капель водной суспензии песка  $T$  (°C) от массовой концентрации частиц  $n$  (%), может быть представлена в виде выражения

$$T = (6,4 \cdot n - 13,2),$$

в случае сажи

$$T = (7,6 \cdot n - 13,2).$$

Отметим, что для капель с частицами глины данная зависимость выражена очень слабо. Подобная закономерность наблюдалась также и у образцов глины, собранных на территории Ленинградской области. Причиной этого могут быть малые размеры частиц глины, что обеспечивает даже при малых массовых концентрациях достаточное количество частиц, обладающих кристаллизующими свойствами, они в наших экспериментах являлись центрами кристаллизации. Максимальная температура, при которой наблюдалась кристаллизация капли водной суспензии глины, составила  $-4,4$  °C.

Температура кристаллизации капель дистиллированной воды в проведённых экспериментах существенно выше температуры гомогенной кристаллизации капель воды в облаках и туманах. Это

является следствием того, что капли в эксперименте подвешиваются на нити в отличие от натуральных условий.

По результатам проведённых исследований можно сделать вывод о том, что попадание аэрозольных частиц естественного происхождения внутрь капли воды способствует кристаллизации переохлаждённых капель воды при более высоких температурах. Частицы глины показывают большую стабильность льдообразующей активности по сравнению с песком и сажей.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 13-05-92697, 15-05-05719А*

*Авторы благодарят Междисциплинарный ресурсный центр по направлению «Нанотехнологии» СПбГУ за проведённые электронно-микроскопические исследования.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Довгалюк Ю. А., Ивлев Л. С.* (1998). Физика водных и других атмосферных аэрозолей. — Л.: Изд-во СПбГУ. 320 с.

*Довгалюк Ю. А., Синькевич А. А., Степаненко В. Д., Веремей Н. Е., Волков Н. Н., Куров А. Б.* Состояние и перспективы развития лабораторного комплекса ГГО для исследований в области физики облаков и активных воздействий. (2008) / В сб.: «Вопросы физики облаков: 50 лет отделу физики облаков ГГО». — СПб.: Астерион, С. 334—361.

*Зуев В. Е., Кабанов М. В.* (1987). Оптика атмосферного аэрозоля. — Л.: Гидрометеиздат. 254 с.

*Каменцев В. Н.* (1983). О структуре частиц льдообразующих веществ // Труды ГГО. Вып. 469. С. 62—70.

*Синькевич А. А., Павар С. Д., Куров А. Б., Волков Н. Н., Михайловский В. Ю., Гопалакришнан В.* (2014). Лабораторные исследования влияния частиц песка и глины на процессы кристаллизации капель воды // Труды ГГО. Вып. 570. С. 197—210.

*Ackerman A. S., Toon O. B., Taylor J. P. J., Doug W., Hobbs P. V., Ferek R. J.* (2000). Effects of Aerosols on Cloud Albedo: Evaluation of Twomey's Parameterization of Cloud Susceptibility Using Measurements of Ship Tracks // J. of Atmos. Sci. 57. P. 2684—2695.



*Hoose C. and Mohler O.* (2012). Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: a review of results from laboratory experiments. // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 12. 467 P. 12531—12621, doi:10.5194/acpd-12-12531.

*Rosenfeld D., Givati A.* (2006). Evidence of orographic precipitation suppression by air pollution induced aerosols in the western USA // *J. Applied Meteorology.* V. 45. P. 893—911.

*Seifert P., Ansmann A., Mattis I., Wandinger U., Tesche, M., Engelmann R., Muller D., Perez C., and Hausteil K.* (2010). Saharan dust and heterogeneous ice formation: Eleven years of cloud observations at a central European EARLINET site // *J. Geophys. Res.* 115, D12204, doi:10.1029/2009JD013222.

*Twohy C. H. and Poellot M. R.* (2005). Chemical characteristics of ice residual nuclei in anvil cirrus clouds: evidence for homogeneous and heterogeneous ice formation // *Atmos. Chem. Phys.* V. 5. P. 2289—2297.

*Warner J. and Twomey S.* (1967). The production of cloud nuclei by cane fires and the effect on cloud droplet concentration // *J. Atmos. Sci.* V. 24. P. 704—706.

УДК 551.594+551.576

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОВЫХ  
ОБЛАКОВ И ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ  
НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ  
( НА ПРИМЕРЕ СТАНЦИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ)**

*Ю. А. Довгалиук, М. Л. Торопова, Н. Е. Веремей*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.  
E-mail: veremey@gmail.com

Поступила в редакцию 12.12.2014  
Поступила после доработки 30.01.2015

**Введение**

Информация о грозовых облаках и особенно о прогнозе их развития имеет большое значение для многих отраслей хозяйственной деятельности, прежде всего для авиации, сельского хозяйства, отраслей, связанных со строительством городов и промышленных объектов, и особенно — объектов сферы энергетики. Исследования грозовых процессов являются актуальным в связи с высокой степенью опасности явления и необходимостью его заблаговременного прогноза. Для решения этих задач используется подход, который предполагает количественное определение критериев грозоопасности либо по данным натурных измерений, либо по результатам численного моделирования.

Особенность настоящего исследования заключается в использовании полной численной модели малой размерности для оценки грозовой активности.

Изучение грозовых облаков связано с рядом трудностей. Наибольшее количество натурных измерений параметров облаков было проведено в XX веке (Селезнева, 1959; Синькевич, 2001; Шишкин, 1964; Шметер, 1972). Сейчас в России такие измерения

почти не проводятся, вместо них получили широкое распространение радиолокационный и спутниковый методы, но они также имеют свои недостатки и ограничения. В силу этих обстоятельств в настоящее время возрастает роль численных методов. В течение последних 70 лет было создано большое количество разнообразных по уровню сложности и детальности описания моделей зарождения и эволюции облаков, образования осадков, реакции облаков на активные воздействия. Такие модели стали использоваться для решения теоретических задач фундаментальных проблем физики облаков (Ивлев, Довгалюк, 1999; Довгалюк и др., 2013).

Целью настоящего исследования является изучение основных характеристик грозových облаков, их обобщение с учетом климатических данных в Северо-Западном регионе на примере станции Санкт-Петербург для периода 2001—2010 гг. с использованием полуторамерной численной модели конвективного облака. Для анализа были отобраны внутримассовые случаи развития конвекции, в качестве основной климатической характеристики использовано число дней с грозой.

### **Краткое описание численной модели**

Изучение грозových облаков долгое время основывалось на визуальных наблюдениях наземных метеорологических станций, которые и в настоящее время не утратили своей актуальности. Однако для детального изучения характеристик грозового облака (вертикальной мощности, скоростей, водностей и др.) все активнее используются численные модели различного класса, большинство из которых не содержат в явном виде описания электрических процессов (Ивлев, Довгалюк, 1999; Роджерс, 1979).

В настоящем исследовании численные эксперименты проводились при помощи созданной в ГГО им. А. И. Воейкова модели конвективного облака. Данная модель является полной нестационарной численной моделью конвективного облака с параметризованной микрофизикой. Она относится к классу моделей малой размерности и является струйной, что предполагает осреднение

всех величин по горизонтальному сечению конвективного потока (Довгалюк и др., 2013). Выбор модели этого класса был обусловлен тем, что она позволяет получать основные характеристики грозовых облаков для большого массива исходных данных.

Достоинством модели является то, что она позволяет расширять число учитываемых микрофизических процессов. Она также требует меньше машинного времени и может быть использована в оперативной работе.

Указанная модель дополнена блоком учета ряда эмпирических закономерностей, которые связывают рассчитанные характеристики облаков с количественными либо качественными характеристиками связанных с ними опасных явлений (ливни, грозы, град, шквалы). На основании дополненной модели был разработан метод прогноза образования и развития конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений.

В настоящем исследовании модель используется для оценки критериев грозоопасности в Северо-Западном регионе. При этом принято, что эволюция облака сопровождается грозой, если расчетная высота верхней границы облака составляет более 5,4 км, максимальная скорость восходящего потока более 5,0 м/с, водность более 1,0 г/м<sup>3</sup>, присутствуют ледяные частицы (Довгалюк и др., 2013; Шишкин, 1964).

Входными данными для модели является прогностическая стратификация воздуха, полученная на основании данных аэрологического зондирования. По результатам проведенных испытаний оправдываемость метода прогноза грозы составила более 80 % (Довгалюк и др., 2013).

## **Результаты климатического исследования**

Грозовая активность характеризуется определенными климатическими параметрами: повторяемостью количества дней с грозой, интенсивностью грозы (количеством разрядов в течение определенного промежутка времени) и продолжительностью. В

данной работе указанные параметры определены для периода 2001—2010 гг.

На рис. 1 представлен график годового количества дней с грозой по наблюдениям на метеостанции Санкт-Петербург (код ВМО – 26063, СПб) за период с 1966 по 2010 год.

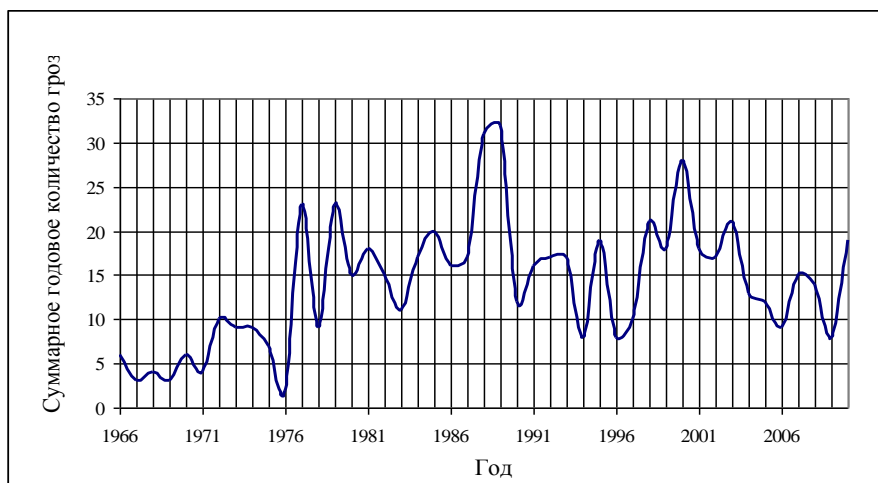


Рис. 1. Суммарное годовое количество дней с грозой в Санкт-Петербурге за период 1966—2010 гг. (по данным наземных метеорологических наблюдений).

Минимальное количество дней с грозой зафиксировано в 1976 году и равно 2, а максимальное — в 1989 году и составило 32. Среднегодовое количество гроз может существенно меняться от года к году. Среднее за период 2001—2010 гг. число дней с грозой равно 14, минимальное — 8 (2009 год), а максимальное — 21 (2003 год). Повторяемость количества дней с грозой по отдельным месяцам представлена в табл. 1. Максимальные значения повторяемости и наибольшее число дней с грозой приходятся на 4 теплых месяца — май, июнь, июль, август.

Таблица 1

Количество дней с грозой и их повторяемость в период 2001—2010 гг.

Месяц	Повторяемость, %	Количество дней с грозой
I	0,7	
II		
III		
IV	0,7	1
V	16,4	24
VI	17,1	25
VII	32,9	48
VIII	26,0	38
IX	4,8	7
X		
XI	1,4	2
XII		

Значимых изменений грозовой деятельности, связанных с глобальным потеплением, не обнаружено. К такому же выводу пришли ранее специалисты МГЭИК (IPCC).

Грозы в исследуемом регионе в значительной части случаев связаны с холодными фронтами, реже с фронтами окклюзии, еще реже (в основном, в ночное время) с теплыми фронтами (Матвеев, 1984; Толмачева, 2012). В летние месяцы часто наблюдаются и внутримассовые грозы, из зафиксированных за период 2001—2010 гг. по данным станции Санкт-Петербург 146 дней с грозой, 33 случая относятся к внутримассовым грозам.

### Результаты численного моделирования

Версия модели кучевого облака, используемая для проведения расчетов, дает хорошие результаты (и изначально создавалась) именно для случаев внутримассовой конвекции. По этой причине для расчетов были отобраны внутримассовые грозы, зафиксированные на

метеорологической станции в период максимума термической конвекции (с 12 до 18 часов по местному времени). Для анализа были отобраны 33 случая внутримассовых гроз.

Согласно выполненным расчетам средняя максимальная мощность ( $\Delta H$ ) облаков составила  $6,8 \pm 2,6$  км, а абсолютная максимальная мощность — 12,2 км. На рис. 2а представлена кривая распределения мощности облаков по интервалам для случаев внутримассовых гроз.

Вертикальная скорость  $W_{max}$  изменялась от 6,3 до 31,2 м/с, в 76 % случаев вертикальная скорость составляла 8,0 — 16,9 м/с (рис. 2б). В каждом расчетном случае определялась абсолютная максимальная вертикальная скорость, среднее значение которой для рассматриваемого периода составило  $15,0 \pm 5,4$  м/с. Отметим, что по эмпирическим данным грозоопасными являются облака с вертикальной скоростью более 5,0 м/с (Довгалюк и др., 2013; Синькевич, 2001).

Высоты нижней и верхней границ облака (НГО и ВГО, соответственно) изменяются в заметных пределах. Согласно проведенным модельным расчетам в исследуемый период минимальная высота НГО изменялась от 0,6 до 2,8 км, а максимальная высота ВГО — от 5,4 до 13,8 км. Можно отметить, что амплитуда изменения ВГО на порядок больше соответствующей величины для НГО. Среднее расчетное значение высоты НГО (1,3 км) несколько превышает экспериментальные значения, полученные в результате исследований всех типов конвективных облаков для Северо-Западного региона России (Селезнева, 1959; Синькевич, 2001). Распределение высот ВГО и НГО по интервалам представлено на рис. 2в и 2г, соответственно.

Среднее значение высоты верхней границы составило  $8,5 \pm 2,5$  км.

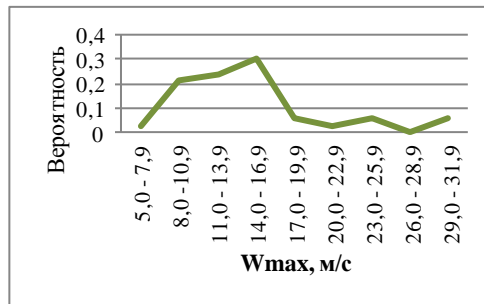
Одним из термодинамических критериев грозоопасности используемой модели является значение высоты верхней границы облака не менее 5,4 км. Для выбранных случаев это условие выполняется.

Для практических работ представляют интерес характерные высоты критических параметров, в том числе высоты изотерм  $0^\circ\text{C}$  и  $-22,5^\circ\text{C}$ .

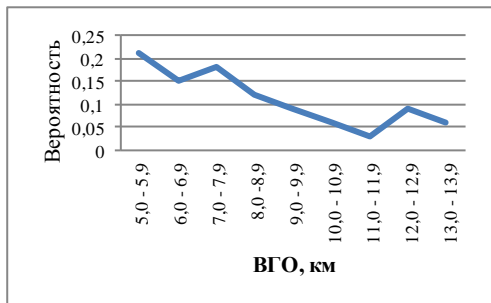
а)



б)



в)



г)

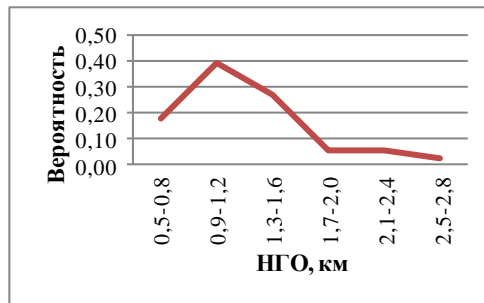


Рис. 2. Вероятность характеристик конвективных облаков по градациям:  
а — мощность, б — вертикальная скорость, в — ВГО облаков, г — НГО облаков.

По шкале ординат отложена вероятность в долях единицы.



Средняя высота изотермы  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выше которой в облаке могут появиться частицы твердой фазы, в данном районе составила  $3,0 \pm 0,5$  км. Высота изотермы  $-22,5^{\circ}\text{C}$  составила  $6,5 \pm 0,6$  км., над этой изотермой вероятность образования твердой фазы значительно повышается (Матвеев, 1984; Шишкин, 1964; Шметер, 1972). Кроме того логарифм радиолокационной отражаемости на высоте изотермы  $-22,5^{\circ}\text{C}$  используется в качестве радиолокационного критерия грозоопасности (Калинин, Смирнова, 2006).

В табл. 2 представлены расчетные характеристики грозовых облаков.

Таблица 2

**Характерные параметры грозовых облаков над Санкт-Петербургом  
(по данным численных экспериментов)**

Параметр	Минимальное	Максимальное	Среднее	$\sigma$	D
Высота НГО, км	0,6	2,8	1,3	0,5	0,2
Высота ВГО, км	5,4	13,8	8,3	2,5	6,4
Мощность облака, км	2,6	12,2	6,8	2,6	6,7
Вертикальная скорость, м/с	6,3	31,2	15,0	5,4	29,3
Высота изотермы $0^{\circ}\text{C}$	2,0	4,4	3,0	0,5	0,3
Высота изотермы $-22,5^{\circ}\text{C}$	5,4	7,8	6,5	0,6	0,3
Продолжительность жизни, мин	52	120	100	22	485,0

Примечание:

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение (СКО);

D- дисперсия (статистическая).

В ряде случаев максимальная мощность облака превышала 10 км, то есть облако достигало тропопаузы, которая широте 60° в летний период находится на высоте порядка 10,7 км (Справочник, 1989). Вертикальная скорость в таких случаях превышала 17,0 м/с. Однако такие значения характеристик в данном регионе наблюдаются относительно редко. За период 2001—2010 гг. было выявлено 5 таких случаев, их характеристики приведены в табл. 3. Под относительным временем достижения максимальной мощности облака ( $\Delta H$ ) или вертикальной скорости ( $W_{max}$ ) понимается время наступления максимального значения параметра относительно продолжительности жизни облака, принятой за 1. Под относительной высотой параметра понимается высота в долях единицы над НГО, где за единицу принята вертикальная мощность облака.

Таблица 3

**Характеристики конвективных (грозовых) облаков с экстремальными значениями мощности и вертикальной скорости**

Параметр	Дата				
	16.07 2001	17.07. 2001	31.07. 2004	17.07. 2005	16.07. 2010
$H_{НГО}$ минимальная, км	1,6	1,0	1,2	1,8	1,2
$H_{ВГО}$ максимальная, км	13,6	12,4	9,6	12,0	13,8
$\Delta H$ максимальная, км	12,0	10,8	8,2	10,2	12,2
Относительное время $\max \Delta H$	0,23	0,29	0,28	0,38	0,29
$W_{max}$ , м/с	34,6	20,9	17,3	18,7	29,2
Высота $W_{max}$ , км	11,2	10,4	3,0	10,4	12,2
Относительная высота $W_{max}$ , км	0,90	0,88	0,29	0,83	0,93
Относительное время $W_{max}$	0,21	0,26	0,18	0,28	0,28
T °С	30,2	29,6	24,2	27,4	31,4
T <sub>d</sub> °С	24,2	23,6	16,2	16,4	21,4

Примечание.

T — температура воздуха,

T<sub>d</sub> — температура точки росы.

Рассмотрим распределение водности облачных и дождевых капель в облаке (табл. 4). Ранее было показано, что вертикальная скорость

( $W$ ), водность облачных ( $Q_c$ ) и дождевых ( $Q_r$ ) капель имеет хорошо выраженные максимумы как по высоте, так и по времени.

Таблица 4

**Характеристики водности грозовых облаков  
(по данным численных экспериментов)**

Параметр облака	$Q_c$ г/м <sup>3</sup>			D	$\sigma$	Высота расположения $Q_c$ max км
	MIN	MAX	Среднее			
$W_{max}$	0,72	2,35	1,63	0,17	0,41	3,0
$\Delta H_{max}$	0,32	2,35	1,16	0,39	0,63	3,2
Интенсивность осадков (максимальная)	0,15	0,66	0,40	0,02	0,15	6,4

Высотные максимумы  $Q_c$  и  $Q_r$  разнесены во времени. Была предпринята попытка выделить стадии жизни по модельным расчетам на основании времени достижения максимальных значений  $W_{max}$ ,  $\Delta H$  и максимальной интенсивности осадков у поверхности земли (Довгалюк и др., 2013; Довгалюк, Станкова, 1989). В различных источниках, как правило, выделяют 3 стадии жизни облака (Матвеев, 1984; Шметер, 1972; Кашлева, 2008; Шишкин, 1964; Риль, 1963). По результатам настоящего исследования максимумы наступают последовательно в моменты времени 0,2 — 0,4 — 0,6 в долях единицы, где за единицу принято время жизни облака ( $100 \pm 22$  мин). Следовательно можно сказать, что моделируемое облако характеризуется относительно малой по времени стадией «молодого облака», довольно продолжительной стадией максимального развития, и наибольшей по времени стадией диссипации (разрушения).

На начальной стадии в момент достижения максимума для каждого случая  $W_{max}$ , максимум  $Q_r$  находится в верхней части облака, выше максимума  $Q_c$ . Можно предположить, что в этой стадии развития облака не так важно взаимное расположение максимумов, поскольку идет активное образование дождевых капель и согласно

теории осадкообразования капли должны перемещаться в облаке по вертикали. В момент максимальной мощности максимумы водности примерно совпадают и находятся примерно посередине облака, чуть ближе к нижней границе. В момент же максимума интенсивности осадков у поверхности земли максимум водности дождевых капель резко увеличивается и смещается к поверхности земли, нижняя граница приподнимается, а водность облачных капель смещается ближе к верхней части облака и существенно уменьшается — облако «вымывается» осадками. Такое состояние облака соответствует стадии диссипации.

В результате исследования были оценены параметры грозовых облаков, характерные для Санкт-Петербурга (табл. 2, рис. 2), экстремальные характеристики грозовых облаков (табл. 3), характеристики водности (табл. 4) и климатические характеристики грозовой активности для периода исследования (табл. 1 и рис. 1).

### **Заключение**

Более 90 % случаев гроз в рассмотренное десятилетие имели место в теплый период года (май—август). Среднегодовое количество дней с грозой для периода 2001—2010 гг. составило 14. В исследуемом периоде по данным наземных метеорологических наблюдений из всего количества дней с грозой 22,3 % (33 случая из 146) составили внутримассовые грозы.

С использованием полной численной нестационарной модели конвективного облака получены характеристики грозовых облаков по станции Санкт-Петербург для отобранных случаев внутримассовых гроз. Характерные параметры составили: наибольшая повторяемость высоты ВГО находится в интервале 5,0—7,9 км, а высоты НГО в интервале 0,5—1,6 км. Вертикальная мощность облака варьируется в широких пределах, но наибольшее количество случаев находится в интервале 4,0—6,9 км. Характерная вертикальная скорость составляет 8,0—16,9 м/с, среднее время жизни облака 100 минут.

За рассмотренный период выявлено 5 экстремальных случаев развития грозовых облаков со значениями вертикальной скорости

более 17 м/с (до 32 м/с) и мощностью 10 км и более. Получены характеристики максимумов водности облачных ( $2,35 \text{ г/см}^3$ ) и их изменения во времени.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-05-05719А.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. (2013). Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков — СПб: «Моби-Дик». 218 с.*

*Довгалюк Ю. А., Станкова Е. Н. (1989). Динамический аспект стадии жизни кучево-дождевого облака // Труды ВГИ. Вып. 76. С. 29—35.*

*Ивлев Л. С., Довгалюк Ю. А. (1999). Физика атмосферных аэрозольных систем — СПб: СПбГУ. 188 с.*

*Калинин Н. А., Смирнова А. А. (2006). Метеорологические локаторы на службе у человека // Метеоспектр. № 2. С.118—125.*

*Кашилева Л. В. (2008). Атмосферное электричество — СПб: РГГМУ. 115 стр.*

*Матвеев Л. Т. (1984). Курс общей метеорологии. Физика атмосферы – Л.: Гидрометеоиздат. 752 с.*

*Риль Г. (1963). Тропическая метеорология. М.: Изд. ИЛ. 368 с.*

*Роджерс Р.Р. (1979). Краткий курс физики облаков. Л.: Гидрометеоиздат. 230 с.*

*Селезнева Е. С. (1959). О границах и вертикальной мощности конвективных облаков // Труды ГГО. Вып.93. С. 3—20.*

*Синькевич А.А. (2001). Конвективные облака северо-запада России — СПб: Гидрометеоиздат. 106 с.*

*Справочник. Облака и облачная атмосфера. (1989). — Л.: Гидрометеоиздат. 646 с.*

*Толмачева Н. И. (2012). Исследование условий развития конвекции в атмосфере // Географический вестник. Вып. 2 (21). С. 60—67.*

*Шишкин Н. С. (1964). Облака, осадки и грозовое электричество — Л.: Гидрометеоиздат. 401 с.*

*Шметер С. М. (1972). Физика конвективных облаков — Л.: Гидрометеоиздат. 232 с.*

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ ОСАДКОВ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНО-ПАССИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

*А. М. Линкова, Г. И. Хлопов*

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
Украина, 61085 Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12  
E-mail: annlinkova@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2015  
Поступила после доработки 10.02.2015

### **Введение**

Знание временных и пространственных изменений микроструктурных характеристик (параметров распределения капель по размерам) жидких осадков важно для изучения процессов их образования и выпадения. Кроме того, определение микроструктуры жидких осадков позволяет не только оценивать процессы, происходящие в дождях, но также получать их интегральные характеристики (интенсивность, водность и др.), необходимые для решения многих практических задач народного и сельского хозяйства.

В настоящее время все большее распространение получают дистанционные методы мониторинга жидких осадков, основанные на решении обратной задачи с применением двухчастотных, поляризационных и активно-пассивных методов зондирования (Mardiana, Iguchi, Takahashi, 2004; Mott, 2007; Olson, Giglio, 1996). При этом обычно используется двухпараметрическая функция распределения частиц по размерам, в то время как в метеорологии более широко применяется класс трехпараметрических распределений, например, гамма-распределение. Поэтому для решения обратной задачи приходится использовать априорные

данные о параметрах распределения, которые обычно основаны на данных контактного зондирования дождей.

В этой связи значительный интерес представляет метод активно-пассивного зондирования жидких осадков, основанный на использовании двухчастотного радара и радиометра (Линкова, Хлопов, 2014). Рассмотренный алгоритм решения обратной задачи основан на численном решении уравнений активно-пассивного зондирования путем создания базы данных для значений принятой мощности двухчастотного радара и радиояркостной температуры радиометра. При этом расчет указанной базы данных проводится путем решения прямой задачи активно-пассивного зондирования жидких осадков для значений параметров гамма-распределения (Айвазян, 1991), меняющихся в заданных пределах. Также в (Линкова, Хлопов, 2014) установлено, что шаг изменения параметров гамма-распределения при создании базы данных непосредственно влияет на точность восстановления характеристик дождя, при этом показано, что большой интервал приводит к потере решений, а малый – к увеличению количества решений и вычислительных ресурсов. Кроме этого, показано, что обратная задача обладает сильной неоднозначностью (имеется большое количество решений для одного и того же набора исходных параметров). В связи с чем, для выбора единственного решения был предложен критерий близости, при использовании которого максимальная погрешность восстановления интенсивности дождя не превышает 12 % в диапазоне интенсивности от 0 до 25 мм/ч для сравнительно небольшой базы данных ( $10^4$  значений).

Однако, несмотря на удовлетворительные результаты восстановления интенсивности осадков, описанный алгоритм приводит к большим погрешностям измерения микроструктурных параметров, которые в отдельных случаях превышают 100 %. Поэтому данная работа направлена на дальнейшее развитие предложенного в (Линкова, Хлопов, 2014) метода активно-пассивного зондирования с целью повышения надежности определения параметров распределения капель по размерам.

## 1. Активно-пассивное зондирование жидких осадков с однородной пространственной структурой

Как показано в (Линкова, Хлопов, 2014), в случае гамма-распределения капель дождя по размерам решение обратной задачи с использованием активно-пассивного зондирования жидких осадков с пространственно-однородным профилем микроструктурных характеристик сводится к решению следующей системы трансцендентных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\Sigma}(\lambda_1) = C_R(\lambda_1)\sigma_0(\lambda_1, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}) \int_{R_0}^{R_1} dR \frac{\exp(-2\Delta R\alpha_{at}^c(\lambda_1, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}))}{R^2}; \\ P_{\Sigma}(\lambda_2) = C_R(\lambda_2)\sigma_0(\lambda_2, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}) \int_{R_0}^{R_1} dR \frac{\exp(-2\Delta R\alpha_{at}^c(\lambda_2, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}))}{R^2}; \\ T_b(\theta, \lambda_3) = \alpha_{ab}(\lambda_3, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}) \int_{R_0}^{R_1} T(R) \exp(-\alpha_{ab}(\lambda_3, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc})(R - R_0)) dR. \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $P_{\Sigma}(\lambda_{1,2})$  — общая принятая мощность вдоль луча радара для двух длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , рассчитываемая как сумма принятых мощностей от каждого элемента разрешения по дальности:

$$P_{\Sigma}(\lambda_{1,2}) = \int_{R_0}^{R_1} P_R(\lambda_{1,2}, R) dR = C_R(\lambda_{1,2}) \int_{R_0}^{R_1} \frac{dR}{R^4} K(R, \lambda_{1,2}) \sigma_0(R, \lambda_{1,2}), \text{ Вт} \times \text{м}, \quad (2)$$

$P_R$  — принятая мощность на входе приемника радара;

$R$  — расстояние от радара до рассеивающего объема;

$R_0$  — расстояние от РЛС до зоны дождя;

$R_1$  — расстояние от РЛС до конца зоны дождя;

$\sigma_0(R)$  — удельная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР);

$K(\lambda_{1,2}, R)$  — коэффициент ослабления при распространении на трассе;

$C_R(\lambda_{1,2})$  — постоянная радара, которая описывает его энергетический потенциал;



$T_b(\theta, \lambda_3)$  — радиояркостная температура радиометра, измеряемая на длине волны  $\lambda_3$ ;

$\theta$  — зенитный угол радиометра;

$\alpha_{ab}^a(R)$  — профиль коэффициента поглощения в атмосфере,

$T(R)$  — профиль термодинамической температуры;

$N_{Tc}$  — концентрация капель;  $\beta_c$ ,

$\alpha_c$  — параметры гамма-распределения капель однородного дождя по размерам.

Гамма-распределение капель однородного дождя по размерам имеет следующий вид:

$$N(D) = \frac{N_{Tc} D^{\alpha_c}}{\Gamma(\alpha_c + 1) \beta_c^{\alpha_c + 1}} \exp\left(-\frac{D}{\beta_c}\right), \quad (3)$$

где  $\Gamma(\alpha_c + 1)$  — гамма-функция.

Для нахождения решения приведенной системы уравнений предложено сформировать базу данных для значений принятой мощности радара на двух частотах и радиояркостной температуры радиометра путем решения прямой задачи активно-пассивного зондирования (1) с использованием всех возможных комбинаций параметров гамма-распределения в диапазонах значений (Литвинов, 1974):

$$\begin{aligned} \alpha_c^{\min} = 0, \alpha_c^{\max} = 7, \beta_c^{\min} = 0, \beta_c^{\max} = 0,7 \text{ мм}, \\ N_{Tc}^{\min} = 100 \text{ м}^{-3}, N_{Tc}^{\max} = 600 \text{ м}^{-3} \quad (4) \end{aligned}$$

При этом величины параметров гамма-распределения меняются в указанных диапазонах с определенным шагом  $\Delta\alpha_c$ ,  $\Delta\beta_c$ ,  $\Delta N_{Tc}$ , от величины которого зависит размер базы данных  $N_{БД}$  (общее количество значений принятой мощности и радиояркостной температуры) и, как следствие, объем и время вычислений:

$$N_{БД} = 3KLM \quad (5)$$

где

$$K = \text{Int} \left( \frac{\alpha_c^{\max} - \alpha_c^{\min}}{\Delta \alpha_c} \right),$$
$$L = \text{Int} \left( \frac{\beta_c^{\max} - \beta_c^{\min}}{\Delta \beta_c} \right),$$
$$M = \text{Int} \left( \frac{N_{Tc}^{\max} - N_{Tc}^{\min}}{\Delta N_{Tc}} \right)$$

— количество значений параметра  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ ,  $N_{Tc}$  соответственно.

Тогда поиск решения системы уравнений (1) в виде микроструктурных характеристик осадков сводится к поиску общих нулей трех уравнений:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}^{\text{ИЗМ}}(\lambda_1) - P_{\Sigma}^{\text{БД}}(\lambda_1) &= 0, \\ P_{\Sigma}^{\text{ИЗМ}}(\lambda_2) - P_{\Sigma}^{\text{БД}}(\lambda_2) &= 0, \\ T_b^{\text{ИЗМ}}(\lambda_3) - T_b^{\text{БД}}(\lambda_3) &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $P_{\Sigma}^{\text{ИЗМ}}(\lambda_{1,2})$  — измеренная радаром принятая мощность;

$P_{\Sigma}^{\text{БД}}(\lambda_{1,2})$  — принятая мощность из сформированной базы данных;

$T_b^{\text{ИЗМ}}(\lambda_3)$  — радиояркостная температура, измеренная радиометром;

$T_b^{\text{БД}}(\lambda_3)$  — радиояркостная температура из базы данных.

Следует отметить, что использование численных методов позволяет найти только приближенные решения каждого из уравнений (6) в связи с дискретностью значений базы данных для  $P_{\Sigma}^{\text{БД}}(\lambda_{1,2})$  и  $T_b^{\text{БД}}(\lambda_3)$ . В работе (Линкова, Хлопов, 2014) показано, что система (1) имеет несколько решений для каждой интенсивности дождя, что приводит к необходимости использования критерия выбора наилучшего решения. В частности, в (Линкова, Хлопов, 2014) предложено использовать критерий близости, который основан на выборе наименьшего расстояния между восстановленными  $p$ -ми

значениями принятой мощности  $P_{\Sigma 1}^{\{p\}}$ ,  $P_{\Sigma 2}^{\{p\}}$  и радиояркой температуры  $T_b^{\{p\}}$ , а также их измеренными величинами  $P_{\Sigma}^{\text{изм}}(\lambda_{1,2})$  и  $T_b^{\text{изм}}(\lambda_3)$ . При этом значения  $P_{\Sigma 1}^{\{p\}}$ ,  $P_{\Sigma 2}^{\{p\}}$  и  $T_b^{\{p\}}$  вычисляются путем решения прямой задачи активно-пассивного зондирования (1) для  $p$ -х полученных решений в виде микроструктурных характеристик  $\alpha_c^{\{p\}}$ ,  $\beta_c^{\{p\}}$   $N_{Tc}^{\{p\}}$ . В результате, предложенный критерий записывается в следующем виде:

$$\Delta = \min(\sqrt{(P_{\Sigma 1}^{\{p\}} - P_{\Sigma 1}^{\text{изм}})^2 + (P_{\Sigma 2}^{\{p\}} - P_{\Sigma 2}^{\text{изм}})^2 + (T_b^{\{p\}} - T_b^{\text{изм}})^2}). \quad (7)$$

Таким образом, полученные в результате решения системы (1) параметры распределения  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ ,  $N_{Tc}$  позволяют вычислить интегральные параметры осадков, в том числе их интенсивность и водность согласно выражениям (Довиак, Зрнич, 1981).

$$I = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} D^3 V(D) \frac{N_{Tc} D^{\alpha_c}}{\Gamma(\alpha_c + 1) \beta_c^{\alpha_c + 1}} \exp\left(-\frac{D}{\beta_c}\right) dD; \quad (8)$$

$$W = \frac{\pi \rho_V N_{Tc} \Gamma(\alpha_c + 4) \beta_c^3}{6 \cdot \Gamma(\alpha_c + 1)} \quad (9)$$

где  $\rho_V$  — плотность воды,  $V(D)$  — скорость падения капель дождя (Gunn, Kinzer, 1949)  $V(D) = 9,65 - 10,3 \exp(-600D)$ , причем диаметр капель измеряется в метрах, а их скорость — в метрах в секунду.

## 2. Анализ решения обратной задачи

Чтобы оценить особенности решения обратной задачи рассмотрим результаты численного моделирования активно-пассивного зондирования дождей для 15 значений интенсивности дождя в

диапазоне  $0 \div 25$  мм/ч (табл. 1). При этом для решения системы (5) использовалась базы данных со следующими параметрами:  $\Delta\alpha_c = 0,4$ ,  $\Delta\beta_c = 0,04$ ,  $\Delta N_{Tc} = 20$  и  $L = M = K = 26$  (размер базы данных  $N_{БД} = 52\,728$  значений).

Моделирование работы радара ( $\lambda_1 = 8,2$  мм,  $\lambda_2 = 3,2$  см) и радиометра ( $\lambda_3 = 3,4$  см) осуществлялось путем решения прямой задачи активно-пассивного зондирования (1) с учетом выбранной интенсивности дождя (табл. 1).

Как показали результаты решения обратной задачи в работе (Линкова, Хлопов, 2014), точность найденного решения, как и ожидалось, зависит от величины шага изменения микроструктурных параметров в базе данных  $P_{\Sigma}^{БД}(\lambda_{1,2})$  и  $T_b^{БД}(\lambda_3)$  — чем меньше шаг, тем выше точность определения микроструктурных характеристик дождя. При этом большой шаг изменения микроструктурных параметров не только снижает точность полученного решения, но может приводить к полной потере решений. Как следует из рис. 1 для выбранной базы данных ( $N_{БД} = 52728$ ) ошибка восстановления

интенсивности дождя  $\delta_I = \left( \frac{I_r - I_m}{I_m} \right) \cdot 100\%$  не превышает 12 % в

исследуемом диапазоне интенсивности  $0 \div 25$  мм/ч ( $I_r$  — восстановленные значения интенсивности,  $I_m$  — заданные значения интенсивности для модели дождя (табл. 1).

Однако при восстановлении микроструктурных характеристик ошибки существенно возрастают и могут превышать 50 %, как показано на рис. 1 б, в, г, где приведены относительные ошибки для параметров  $\alpha_c, \beta_c, N_{Tc}$ :

$$\delta_{\alpha} = \left( \frac{\alpha_c^r - \alpha_c^m}{\alpha_c^m} \right) \cdot 100\%,$$

$$\delta_{\beta} = \left( \frac{\beta_c^r - \beta_c^m}{\beta_c^m} \right) \cdot 100\%,$$

$$\delta_N = \left( \frac{N_{Tc}^r - N_{Tc}^m}{N_{Tc}^m} \right) \cdot 100\% ,$$

где  $\alpha_c^r$ ,  $\beta_c^r$ ,  $N_{Tc}^r$  — восстановленные значения параметров распределения,  $\alpha_c^m$ ,  $\beta_c^m$ ,  $N_{Tc}^m$  — заданные значения параметров распределения для модели дождя (табл. 1).

*Таблица 1*

<b>Параметры моделей дождя</b>				
<b>№</b>	<b><math>I_m</math>, мм/ч</b>	<b><math>\alpha_c^m</math></b>	<b><math>\beta_c^m</math></b>	<b><math>N_{Tc}^m</math></b>
1	0,7	3,8	0,14	134
2	3	2,4	0,23	303,1
3	5	1,93	0,28	393,1
4	7	1,68	0,31	441
5	9	1,5	0,34	466,5
6	10	1,39	0,37	480
7	12	1,29	0,39	487,2
8	14	1,22	0,42	491,1
9	15	1,16	0,44	493,1
10	16,5	1,1	0,46	494,2
11	18	1,06	0,48	494,8
12	20	1,02	0,49	495,1
13	21	0,98	0,51	495,3
14	22	0,95	0,53	495,35
15	23	0,92	0,54	495,4

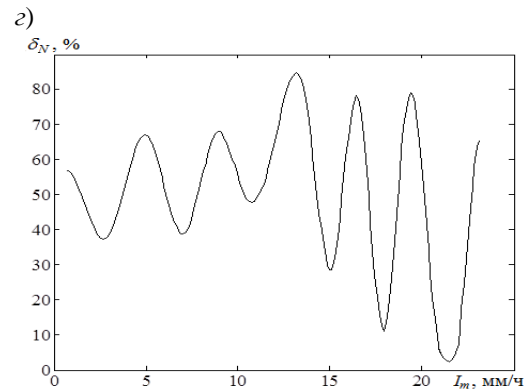
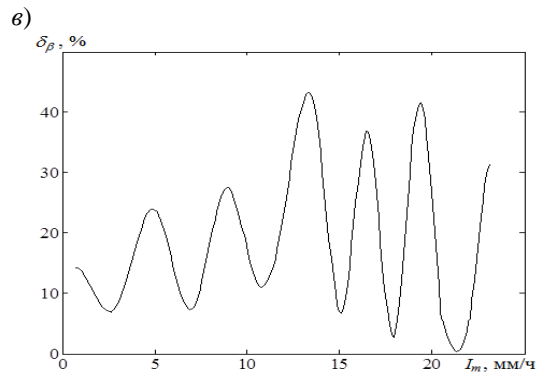
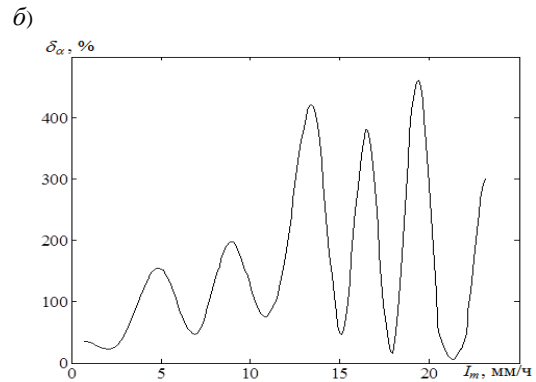
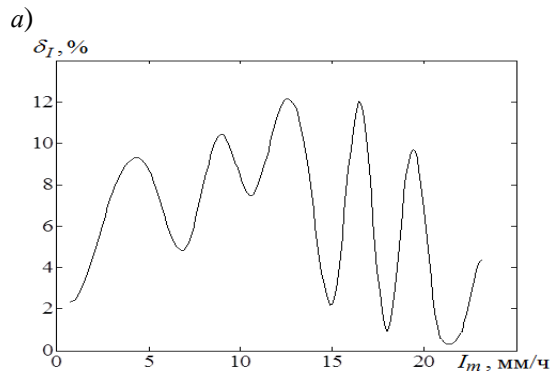


Рис. 1. Зависимость ошибки восстановления параметров дождя от его интенсивности.

а) — интенсивность б) —  $\alpha_c$ ; в) —  $\beta_c$ ; г) —  $N_{Tc}$

Причиной большой погрешности восстановления микроструктурных характеристик является выбранный способ построения базы данных, а также несовершенство используемого критерия близости для выбора единственного решения. В связи с этим, представляет интерес исследовать пути повышения надежности определения микроструктурных характеристик за счет уменьшения шага изменения величин  $\Delta\alpha_c$ ,  $\Delta\beta_c$ ,  $\Delta N_{Tc}$ , а также путем использования дополнительных критериев выбора лучшего решения.

### **3. Решение обратной задачи по восстановлению микроструктурных характеристик жидких осадков**

Как было показано в работе (Линкова, Хлопов, 2014), потери решений обратной задачи (1) отсутствуют, если шаг изменения параметров распределения не превышает следующих значений  $\Delta\alpha_c \leq 0,001$  и  $\Delta\beta_c \leq 0,0001$ . При этом величина шага для концентрации капель  $\Delta N_{Tc}$  не меняет общего количества решений, однако, в значительной мере, определяет их точность. В связи с этим представляет интерес численное решение системы уравнений (1) с использованием базы данных с уменьшенным шагом, например:  $\Delta\alpha_c = 0,001$ ,  $\Delta\beta_c = 0,0001$ ,  $\Delta N_{Tc} = 20$ ,  $K = 7000$ ,  $L = 7000$ ,  $M = 26$ ,  $N_{БД} = 1,274 \cdot 10^9$ , что практически на два порядка меньше, чем в предыдущем случае (Линкова, Хлопов, 2014).

На рис. 2а приведена зависимость количества решений  $n_s$  системы (1) от интенсивности модели дождя (табл. 1) для расширенной базы данных  $N_{БД} = 1,274 \cdot 10^9$ . Для сравнения на рис. 2б показана аналогичная зависимость для меньшей базы данных  $N_{БД} = 52728$  (Линкова, Хлопов, 2014). Как видно, уменьшение шага изменения параметров распределения (увеличение размера БД) приводит к значительному возрастанию количества решений. Кроме того, как неожиданный и труднообъяснимый факт, следует отметить, что слабые дожди с интенсивностью менее 5 мм/ч обладают большей неоднозначностью.

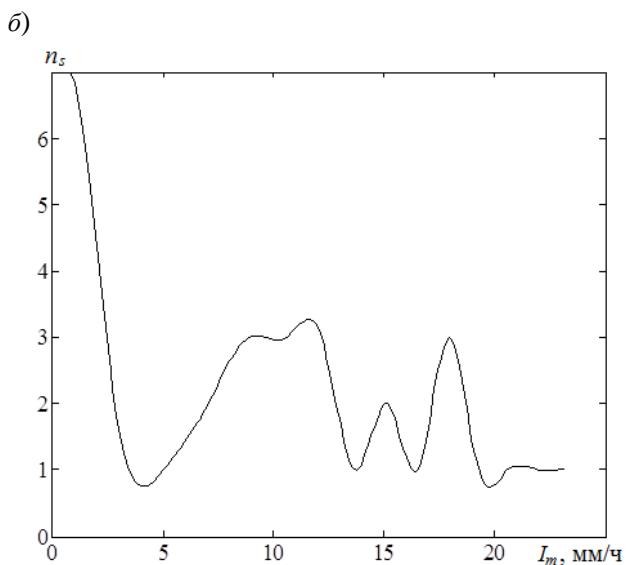
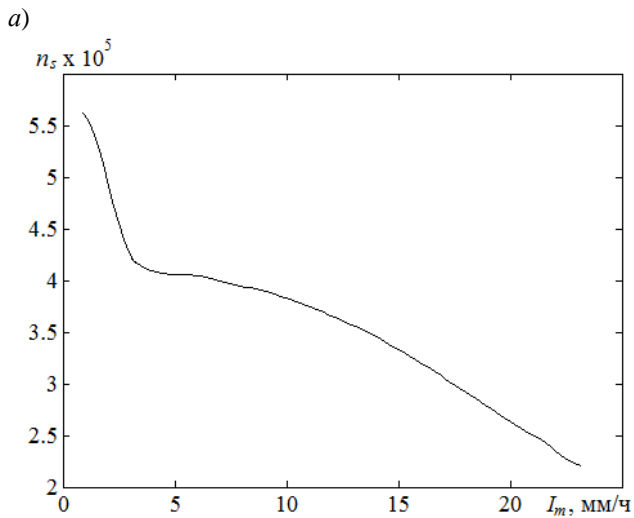


Рис. 2. Количество решений для расширенной базы данных при  $N_{\text{БД}} = 1,274 \cdot 10^9$  (а) и для базы при  $N_{\text{БД}} = 52728$  согласно (Линкова, Хлопов, 2014) — (б).



Чтобы выбрать наилучшее решение в смысле близости к истинному, необходимо привлекать дополнительную информацию, в качестве которой предложено использовать критерий согласия полученных решений обратной задачи и данных активного зондирования в обоих частотных каналах в каждом элементе разрешения по дальности. В этом случае для каждого полученного решения (наборы значений параметров распределения  $\{\alpha_c^r, \beta_c^r, \Delta N_{Tc}^r\}$ ) проверяется принадлежность к решению для каждого элемента разрешения по дальности для двух длин волн. Полученные результаты, приведенные на рис. 3, показывают, что предложенный подход позволяет уменьшить количество решений, особенно для интенсивностей более 5 мм/ч, хотя и не обеспечивает полного устранения неоднозначности. Поэтому для выбора единственного решения предлагается дополнительно использовать и другие критерии, в частности, рассмотренный в (Линкова, Хлопов, 2014) критерий близости, а также вычисление моды, медианы и среднего значения полученных решений.

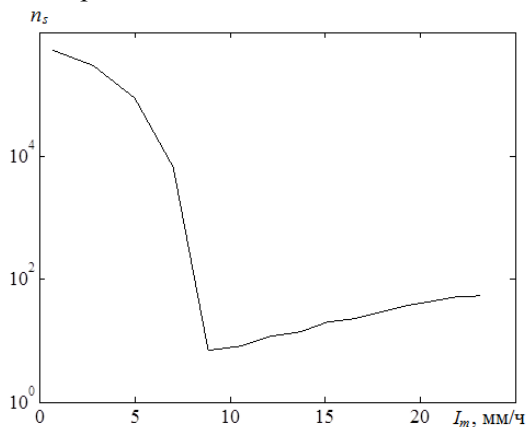


Рис. 3. Зависимость количества решений от заданной в модели интенсивности дождя для расширенной базы данных  $N_{БД} = 1,274 \cdot 10^9$  после уменьшения неоднозначности.

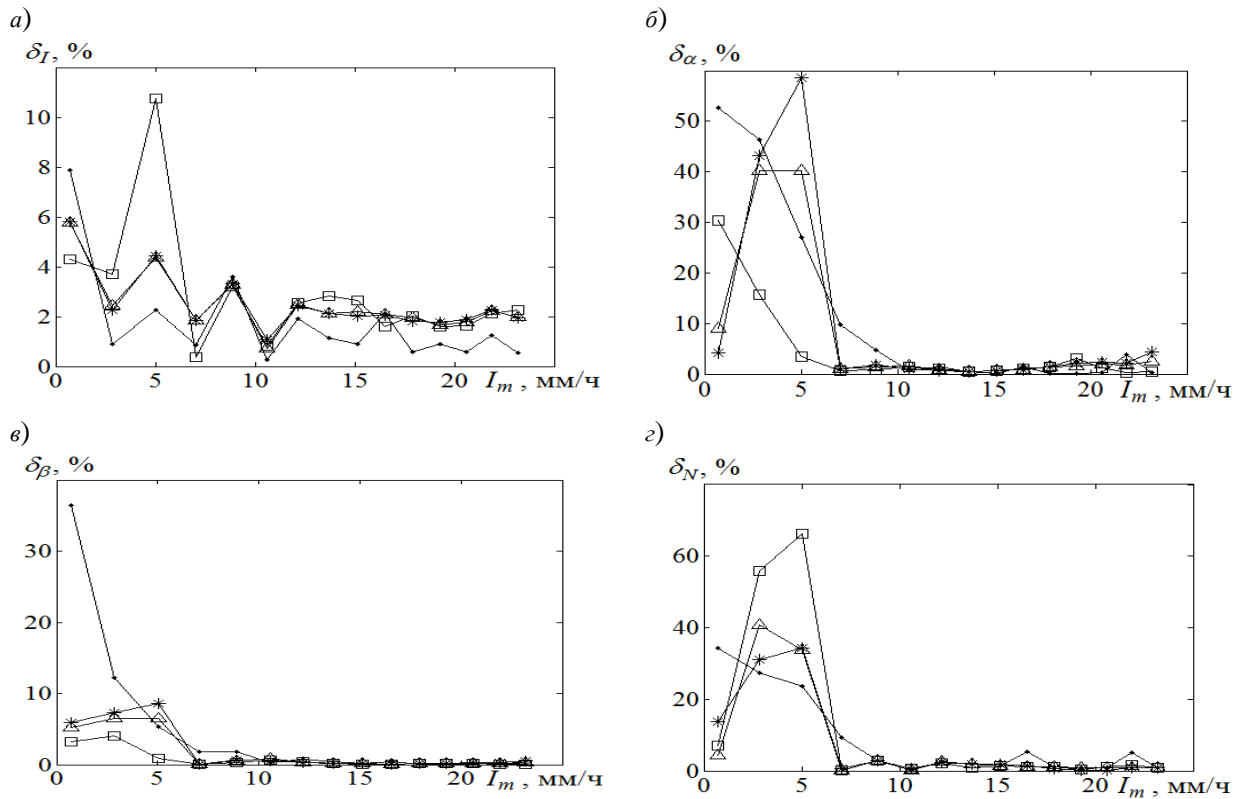


Рис. 4. Ошибки восстановления значений параметров жидких осадков:

а) — интенсивность б) —  $\alpha_c$ ; в) —  $\beta_c$ ; г) —  $N_{Tc}$

На рис. 4 показаны ошибки восстановления значений параметров жидких осадков, включая интенсивность и параметры распределения, полученные для различных путей выбора единственного решения. Здесь точки соответствуют решению, выбранному с помощью критерия близости, звездочки — среднему ансамблю решений, треугольники — медианному значению ансамбля, квадратики — моде ансамбля.

Приведенные рисунки показывают, что наибольшие ошибки восстановления параметров жидких осадков соответствуют области малых интенсивностей  $0 \div 5$  мм/ч. При этом для больших значений интенсивности  $> 5$  мм/ч все использованные критерии дают примерно одинаковые результаты, которые не превышают 5%. Для микроструктурных характеристик  $\alpha_c$  и  $\beta_c$  в диапазоне интенсивности осадков  $> 5$  мм/ч погрешность восстановления по всем критериям не превышает 5% для  $\alpha_c$  и 1% для  $\beta_c$ . Однако, в области малых интенсивностей наилучшие результаты дает применение критерия в виде моды (рис. 4 а, б, квадраты), использование которого для выбора единственного решения приводит к максимальной ошибке менее 32% для  $\alpha_c$  и менее 5% для  $\beta_c$ .

В свою очередь, для концентрации в области малых значений интенсивности модели дождя целесообразно использовать критерий близости, максимальная ошибка которого менее 35%, а в диапазоне  $> 5$  мм/ч — не более 5%.

Таким образом, из рис. 4 видно, что предложенный алгоритм позволяет восстанавливать параметры жидких осадков с приемлемой погрешностью в диапазоне интенсивности более 5 мм/ч, в то время как в области малых интенсивностей ( $< 5$  мм/ч) — обеспечивает существенное снижение погрешности оценок микроструктурных параметров жидких осадков.

#### 4. Вероятностные характеристики решений обратной задачи в области малых интенсивностей

В связи с тем, что наибольшие ошибки восстановления параметров жидких осадков наблюдаются в диапазоне интенсивности до 5 мм/ч, целесообразно провести более детальный анализ этой области.

В значительной мере пониманию полученных выше результатов может способствовать оценка закона распределения полученных решений в указанной области. При этом следует отметить, что возрастанию погрешности в этой области сопутствует большая неоднозначность решения по сравнению с областью интенсивности более 5 мм/ч (см. рис. 3). В этом случае количество решений для диапазона малых интенсивностей превышает  $8 \cdot 10^4$ , а для диапазона более 5 мм/ч — менее 70 (см. рис. 3).

Действительно, как показывают гистограммы распределения получаемых решений, для малых интенсивностей характерны несимметричные и двумодовые распределения в соответствии с рис. 5 *а, б*, где построены распределения решений для параметра  $\alpha_c$  и интенсивности 3 и 5 мм/ч (жирная вертикальная линия соответствует истинному решению). Как видно, в указанных случаях применение моды в качестве критерия выбора единственного решения дает наилучшие результаты (см. рис. 4 *а, б*). При этом с ростом интенсивности осадков гистограммы стремятся к виду нормального распределения (рис. 5 *в*), что приводит к практически одинаковому результату оценки единственного решения по всем критериям.

Отдельного рассмотрения требуют вероятностные характеристики решений для концентрации капель дождя, которые имеют весьма специфический характер в области малых интенсивностей, как показано на рис. 6 *а, б* для интенсивностей 3 мм/ч и 5 мм/ч. Это в значительной мере объясняет большие погрешности при выборе единственного решения с помощью указанных критериев. Для области интенсивности более 5 мм/ч гистограммы стремятся к виду нормального распределения и, соответственно, ошибка определения единственного решения существенно уменьшается (рис. 6 *в*).

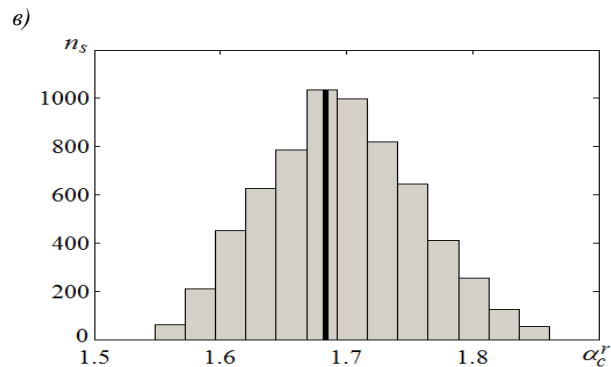
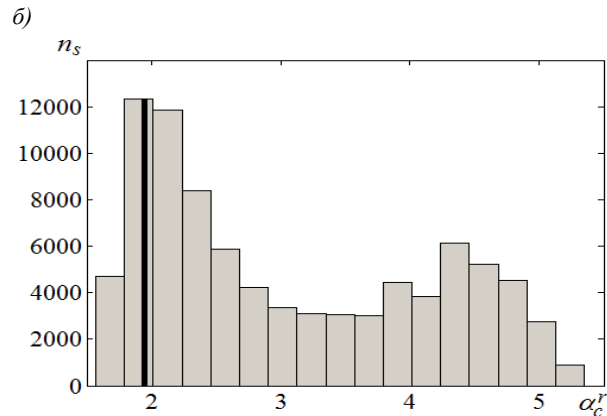
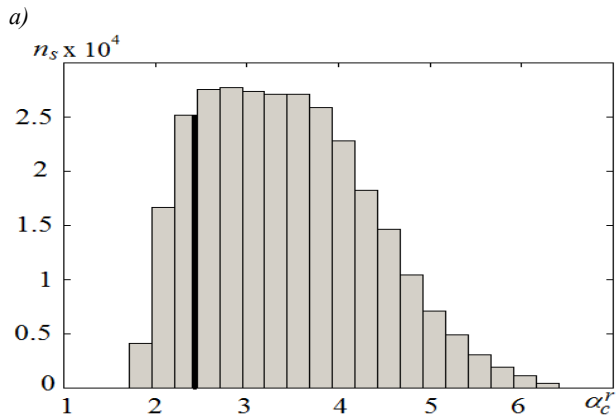


Рис. 5. Гистограммы распределения решений для параметра  $\alpha_c$  при различной интенсивности:

а) — 3 мм/ч, б) — 5 мм/ч, в) — 7 мм/ч.

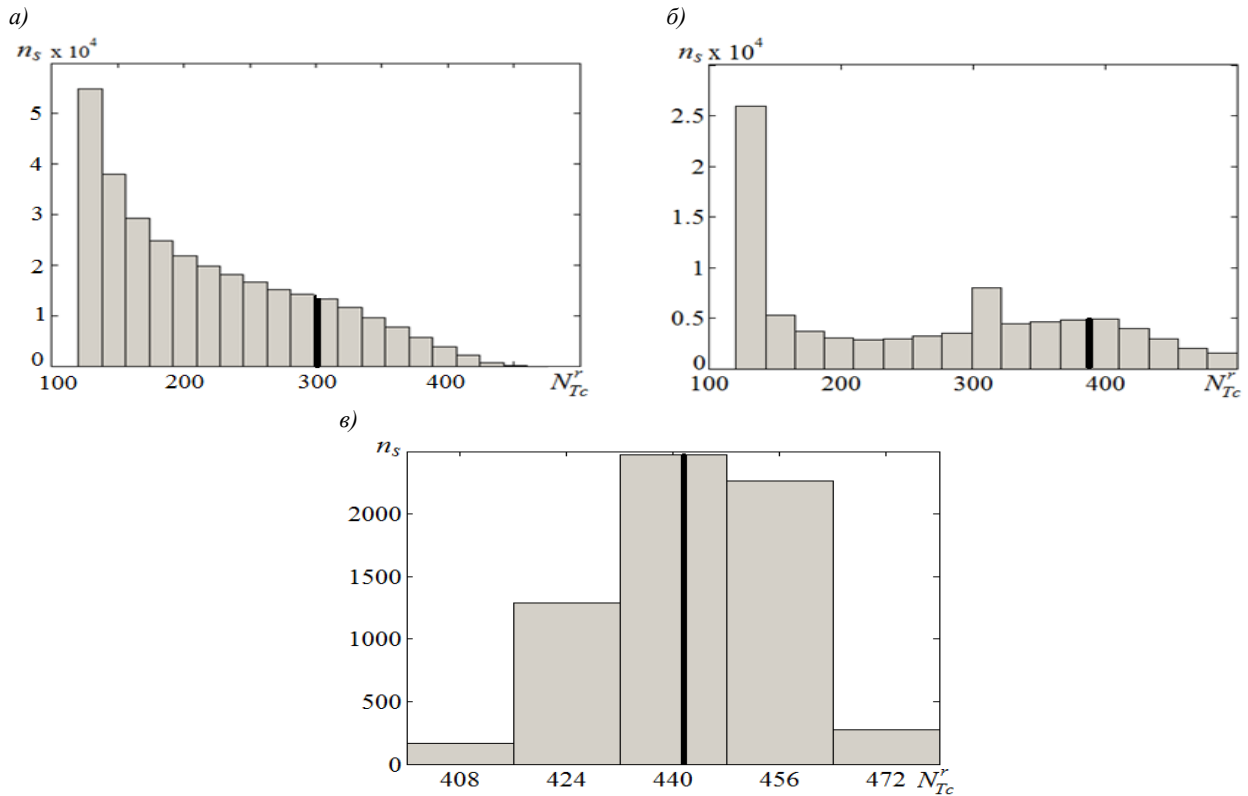


Рис. 6. Гистограммы распределения решений для концентрации при различной интенсивности:  
 а) — 3 мм/ч, б) — 5 мм/ч, в) — 7 мм/ч.

## Заключение

В работе исследован алгоритм восстановления микроструктурных параметров дождей на основе активно-пассивного зондирования с использованием двухчастотного радара и радиометра.

Предложены способы повышения надежности результатов дистанционного зондирования путем уменьшения неоднозначности решения обратной задачи и использования различных критериев выбора единственного решения.

Показано, что использование в качестве дополнительной информации значений принятой мощности в каждой ячейке дальности для двух длин волн позволяет уменьшить количество решений обратной задачи по восстановлению микроструктурных характеристик осадков путем активно-пассивного зондирования, особенно для дождей с интенсивностью более 5 мм/ч.

Установлено, что наибольшие ошибки восстановления параметров жидких осадков соответствуют области малых интенсивностей осадков ( $0 \div 5$  мм/ч). Для интенсивности осадков более 5 мм/ч все исследованные критерии дают примерно одинаковые результаты, которые обеспечивают восстановления параметров осадков с точностью не менее 5%. Установлено, что применение моды ансамбля решений в качестве критерия выбора единственного решения обратной задачи по восстановлению микроструктурных характеристик осадков дает наилучшие результаты для параметров распределения  $\alpha_c$  и  $\beta_c$ , а критерий близости — для концентрации частиц.

Показано, что гистограммы распределения решений обратной задачи для малых значений интенсивностей менее 5 мм/ч имеют несимметричный или бимодальный характер, а при увеличении интенсивности осадков их вид приближается к нормальному распределению. Это объясняет большие ошибки восстановления параметров распределения при использовании указанных критериев выбора единственного решения, а также их уменьшение с ростом интенсивности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Айвазян Г. М.* (1991). Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках. — Л.: Гидрометеоиздат. 480 с.

*Довиак Р., Зрнич Д.* (1981). Доплеовские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. — Л.: Гидрометеоиздат. 512 с.

*Линкова А. М., Хлопов Г. И.* (2014). Восстановление интенсивности жидких осадков с помощью многочастотного активно-пассивного зондирования // Радиопизика и электроника. Харьков. Т. 5(19). № 3. С 26—32.

*Литвинов И. В.* Структура атмосферных осадков (1974). — Л.: Гидрометеоиздат. 153 с.

*Gunn R., Kinzer G. D.* (1949). The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air // J. Appl. Met. Vol. 6. P. 243—248.

*Mardiana R., Iguchi T., Takahashi N.* (2004). A dual-frequency rain profiling method without the use of a surface reference technique // IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens. Vol. 42. № 10. P. 2214—2225.

*Mott H.* (2007). Remote Sensing with Polarimetric Radar. - John Wiley & Sons. 309 p.

*Olson W. S., Giglio L.* (1996). A Method for Combined Passive□Active Microwave Retrievals of Cloud and Precipitation Profiles // J. Appl. Met. Vol. 35. P. 1763—1789.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВО ВРЕМЯ ГРОЗ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

*Н. И. Герасименко<sup>2</sup>, Б. Г. Зайнетдинов<sup>1</sup>, В. Н. Морозов<sup>1</sup>,  
И. Б. Попов<sup>1</sup>,*

<sup>1</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет  
Санкт-Петербург, Малоохтенский пр., 98  
E-mail: bulatoss@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.05.2014

Поступила после доработки 22.12.2014

### Введение

Одной из важных и актуальных задач атмосферного электричества является обработка и интерпретация данных, получаемых на станциях атмосферно-электрической сети. Как известно основными параметрами, измеряемыми на этих станциях является электрическая проводимость атмосферы ( $\lambda$ ) и напряженность электрического поля (E). Метод вейвлет-анализа в применении к атмосферному электричеству рассматривался в работах (Анисимов, Шихова, 2010; Mareev et al. 2003.) Основы теории вейвлет-анализа и некоторые примеры его применения к задачам океанологии и метеорологии изложены в статье Н. М. Астафьевой (1996) Теоретические основы вейвлет-анализа рассмотрены в ряде монографий (Combes, Grossman, Tchamitchian, 1989; Daubechies, 1991; Coifman, 1992; Chui, 1992).

В настоящей работе метод вейвлет-анализа используется для обработки данных напряженности электрического поля, полученных на в пос. Воейково, применительно к грозовой обстановке.

## Постановка задачи

С целью совершенствования методов обработки результатов наблюдений за приземным атмосферным электричеством, которые выполняются на специализированных пунктах сети Росгидромета, проведены исследования спектральных характеристик напряженности электрического поля ( $E$ ) во время гроз. Предпосылкой для проведения таких исследований стали ранее выполненные статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на параметры атмосферного электричества (Попов, 2008). На рис. 1 показано распределение значений  $E$  в виде коробчатой диаграммы в зависимости от различных метеорологических явлений. На диаграмме границам «коробок» соответствуют 25-й и 75-й процентиля, линии внутри коробки — 50-й процентиль. Вертикальным линиям на усах соответствуют 9-й и 91-й процентиля, границам усов — 2-й и 98-й. Точками на диаграмме обозначены выбросы. Исходной для анализа являлась информация о среднечасовых значениях  $E$ , хранящаяся в режимно-справочном банке данных «Атмосферное электричество» специализированного центра ГГО, и стандартная метеорологическая информация станции Воейково за период с 1989 по 2007 гг.

На приведенной диаграмме хорошо видно, что такие явления как гроза, град, метель и интенсивные осадки сопровождаются значительными вариациями  $E$ . При дожде и мокром снеге электрические заряды вблизи поверхности земли имеют преимущественно отрицательный знак, а при метелях — положительный.

Полученные результаты могут быть использованы, например, для исследования изменений фоновых значений характеристик атмосферного электричества, когда целесообразно исключить из анализа периоды действия локальных электрических зарядов. Однако даже в отсутствии явлений, как видно на диаграмме, в некоторых случаях абсолютные среднечасовые значения  $E$  могут достигать крайне высоких величин. В связи с этим представляется перспективным развитие комбинированного подхода к исследованию

данных по атмосферному электричеству с использованием методов статистического и спектрального анализа.

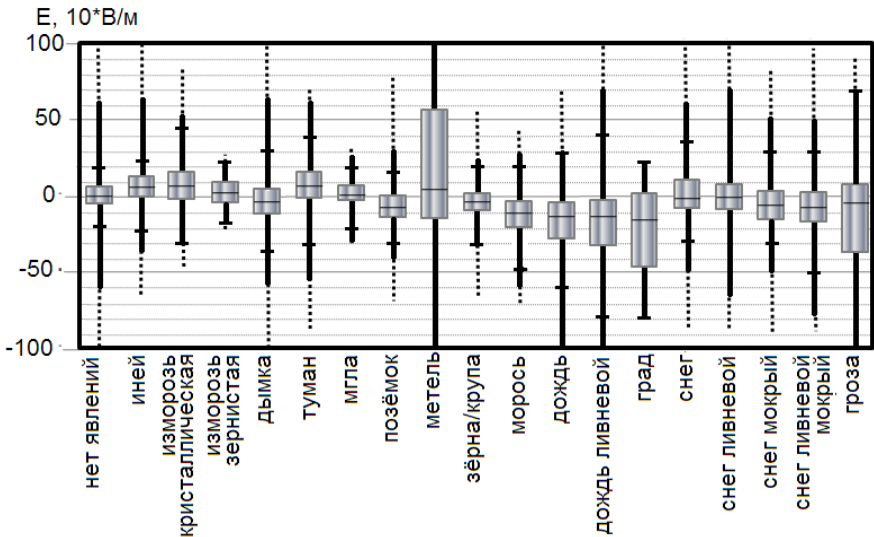


Рис. 1. Статистика распределения значений напряженности электрического поля в зависимости от метеорологических явлений.

Основанием для использования метода вейвлет-анализа являются особенности изменения напряженности электрического поля во времени: наличие резких изменений, которые не удовлетворяют условиям периодичности и проявляются на ограниченном временном интервале.

### Понятие вейвлет-анализа

Вейвлет-анализ является относительно новой областью прикладной математики. Интерес к этой области, значительно возросший за последние десятилетия, объясняется тем, что вейвлет-анализ представляет собой удобный математический аппарат, способный решать те задачи, в которых применение традиционного Фурье-анализа оказывается неэффективным.

Вейвлеты — это семейство функций, которые получаются из одной функции посредством ее сдвига и растяжения по оси времени. Все вейвлет-преобразования рассматривают любую функцию в виде разложения на колебания, локализованные по времени и частоте. Это и является причиной нередкой замены ими обычного преобразования Фурье, которое не имеет локальности во временной области. В то время, как Фурье-анализ традиционно используется для анализа и обработки стационарных сигналов, вейвлет-анализ применяется для анализа и обработки нестационарных сигналов.

Вейвлет преобразования в настоящее время применяются в самых различных областях, а именно: в молекулярной динамике, сейсмической геофизике, оптике, физике плазмы, квантовой механике, компьютерной графике, вычислительной томографии, при обработке изображений, анализе кровяного давления, пульса, ЭКГ, при исследовании климата и т. д. (Захарова , Шестаков , 2012). В данной работе предпринята попытка применить его к исследованию градиента потенциала во время грозы.

Непрерывное вейвлет преобразование осуществляется путем свертки:

$$Wf(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{a, t_0}^*(t) dt, \quad (1)$$

анализируемой функции  $f(t)$  с двухпараметрической вейвлет функцией, которая получается из материнского вейвлета  $\psi(t)$ ,

$$\psi_{a, t_0}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (2)$$

Параметр  $a$ , называемый масштабом вейвлет преобразования ( $a \in \mathbb{R}^+$ ), отвечает за ширину вейвлета, а  $b \in \mathbb{R}$  — параметр сдвига, определяющий положение вейвлета на оси  $t$ . Множитель  $1/a$  в соотношении (2) введен для того, чтобы все вейвлет функции имели постоянную (единичную) норму в пространстве  $L2(\mathbb{R})$ :

$$\|\psi_{a, t_0}\|_{L^2} = \|\psi_0\|_{L^2} = 1, \quad (3)$$

где норма пространства  $L2(\mathbb{R})$  определяется как:

$$\|f\|_{L^2} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot f^*(x) dx, \quad (4)$$

Выполнение условия (2.3), в силу теоремы Парсеваля, приводит к:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{\Psi}(\omega) \cdot \widehat{\Psi}^*(\omega) d\omega = 1, \quad (5)$$

где  $\widehat{\Psi}(\omega)$  Фурье-образ вейвлет функции.

Из последних соотношений, в частности, следует, что непрерывное вейвлет-преобразование изометрически отображает пространство функций одной переменной в двумерное вейвлет пространство, и, следовательно, информация, содержащаяся в коэффициентах вейвлет-преобразования, является избыточной. Отсюда следует, например, тот факт, что непрерывное вейвлет-преобразование случайного сигнала будет показывать наличие корреляции, которой нет в сигнале, но которая естественным образом присутствует в самом преобразовании. Это является достаточно существенным недостатком вейвлет-преобразования и его необходимо учитывать при интерпретации вейвлет-спектров. (*Короновский., Храмов, 2003*)

Для анализа сигналов удобно использовать следующие их характеристики: вейвлет-спектр  $Wf(a,b)$ , его модуль  $|Wf(a,b)|$ , плотность энергии сигнала  $PWf(a,b)$ , скелетон, энергограмму и дисперсию модуля вейвлет-коэффициентов.

Плотность энергии сигнала задается соотношением:

$$PWf(a, b) = |Wf(a, b)|^2. \quad (6)$$

Зависимость  $PWf(a,b)$  также называют скейлограммой.

Под скелетоном поверхности в пространстве понимают картину линий, соединяющих локальные экстремумы (отдельно минимумы и максимумы) этой поверхности.

Под энергограммой непрерывного вейвлет-преобразования будем понимать интеграл:

$$E_{Wf}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |Wf(a, b)|^2 db. \quad (7)$$

Энергограмма представляет собой распределение полной энергии сигнала  $E$ . Последняя связана с энергограммой следующим соотношением:

$$E = \int_0^{\infty} E_W f(a) \frac{da}{a^2}, \quad (8)$$

где интегрирование производится по всем масштабам  $a$ . Положение максимумов на  $E_W f(a)$  можно интерпретировать как средний период элементарных событий, вносящих основной вклад в энергию анализируемого процесса (Лазоренко и др., 2007).

Поскольку вейвлет-преобразование есть скалярное произведение анализирующего вейвлета на заданном масштабе и анализируемого сигнала, коэффициенты  $W(a,b)$  содержат комбинированную информацию об анализирующем вейвлете и анализируемом.

Выбор анализирующего вейвлета, как правило, определяется тем, какую информацию необходимо извлечь из сигнала. Каждый вейвлет имеет характерные особенности во временном и в частотном пространстве, поэтому иногда с помощью разных вейвлетов можно полнее выявить и подчеркнуть те или иные свойства анализируемого сигнала.

Вещественные базисы часто конструируются на основе производных функции Гаусса:

$$\psi_m(t) = (-1)^m \partial_t^m \left[ \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \right]$$

(здесь  $\partial_t^m = \partial_{\tau[\dots]} / \partial \tau m$ ,  $m \geq 1$ ). Более высокие производные имеют больше нулевых моментов и позволяют извлечь информацию об особенностях более высокого порядка, содержащихся в сигнале.

Наиболее удачные модели фрактальных сверхширокополосных (СШП) сигналов с практической точки зрения описываются некоторыми вейвлетобразующими функциями, многие из которых являются СШП сигналами. К ним относятся, в частности, вейвлеты Добеши, Симлета, койфлеты, биортогональные вейвлеты.

Для удобства далее в работе будем использовать следующие обозначения указанных вейвлетов: вейвлеты Добеши 2, 3, 4-го

порядка записываем соответственно как db2, db3, db4; вейвлеты Симлета 2, 3, 4-го порядка — sym2, sym3, sym4; 1-го порядка — coif1, биортогональные вейвлеты — bior3.3, bior 3.5.

Вид вейвлетобразующих функций данных вейвлетов во временной области приведен на рис. 2.

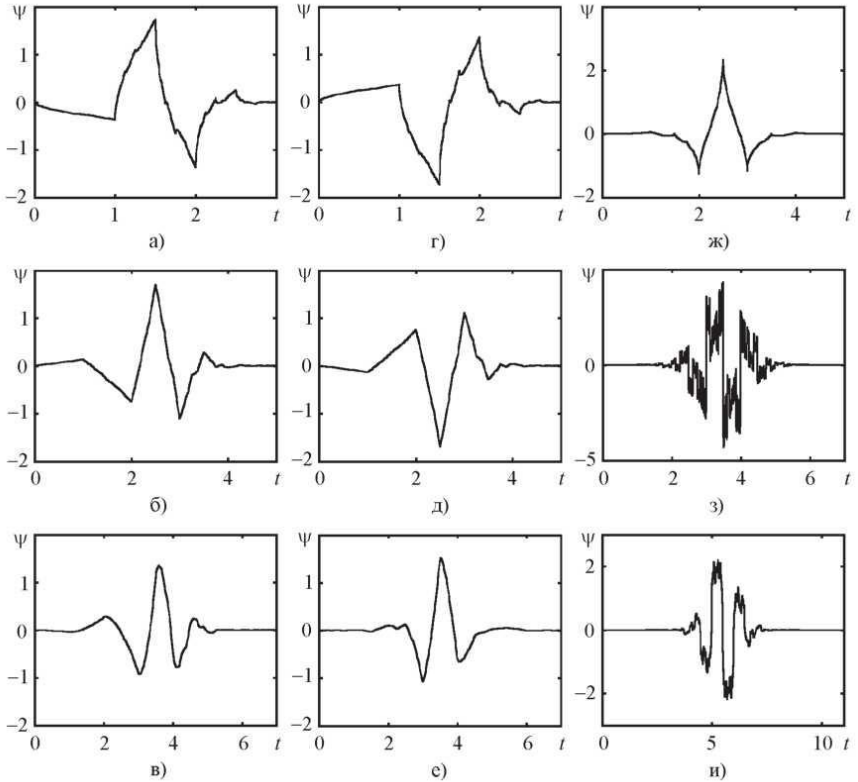


Рис. 2. Примеры вейвлетобразующих функции во временной области: а — db2, б — db3, в — db4, г — sym2, д — sym3, е — sym4, ж — coif1, з — bior3.3, и — bior3.5 (Лазоренко, Черногор, 2005).

Основными особенностями предлагаемых моделей является то, что все они, во-первых, имеют фрактальную структуру, во-вторых, являются СШП сигналами (Лазоренко, Черногор, 2005).

### Полученные результаты

Как говорилось ранее, данные по параметрам атмосферного электричества хранятся в банке данных «Атмосферное электричество, версия 1.0». В ходе работы были выделены суточные вариации напряженности электрического поля, синхронизированные с метеорологическими данными, полученными в дни грозовой активности в период с мая по июль 2011 года на базе ГГО в пос. Воейково. Сигнал напряженности электрического поля во время грозы довольно нестационарен, что подтверждает целесообразность применения вейвлет-анализа для их интерпретации.

При построении картины коэффициентов вейвлет-преобразования за основу вычислений было взято соотношение, которым задается непрерывное вейвлет преобразование (1). В качестве вейвлетобразующих функций были выбраны следующие вейвлеты: биортогональный порядка 3.3 (biog3.3), Добеши 2-го и 4-го порядков (db2, db4), Гаусса 4-го порядка (gaus4), «мексиканская шляпа» (mexh), Мейера (meyr), Морле (morl), Койфмана 1-го порядка и вейвлет Хаара.

В результате для каждого ряда данных были получены картины распределения вейвлет-коэффициентов. На рис. 3 и 4 показаны суточный ход напряженности поля атмосферы (рис. 3а и 4а), их спектры вейвлет-преобразования (рис. 3б и 4б), картины одинаковых значений вейвлет-коэффициентов (рис. 3в и 4в) и спектры распределения плотности энергии (рис. 3г и 4г). На рис. 3б,в,г и 4б,в,г) по осям ординат отложены значения масштабирующего коэффициента вейвлет-преобразования  $a$ . Разложение в вейвлет-спектр осуществлялось при  $a=1\dots 256$ .



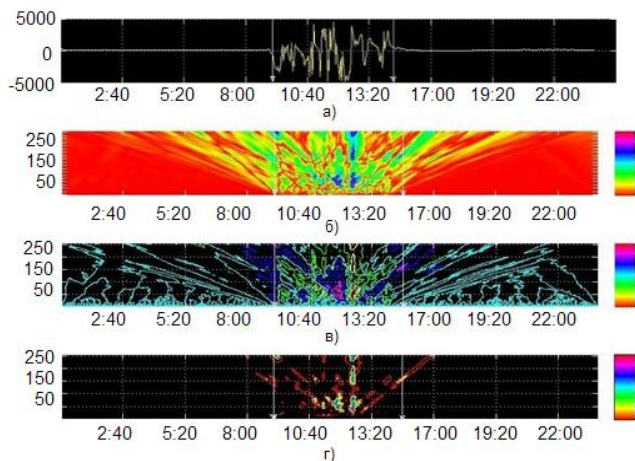


Рис. 3. Вейвлет преобразование сигнала суточного хода напряженности электрического поля за 12.07.2011 (вейвлет  $\text{bior3.3}$ ):  
 а — анализируемый сигнал, б — спектр коэффициентов  $W(a,b)$ ,  
 в — изолинии коэффициентов  $W(a,b)$ , г — распределение плотности энергии  $EW(a,b)$ .

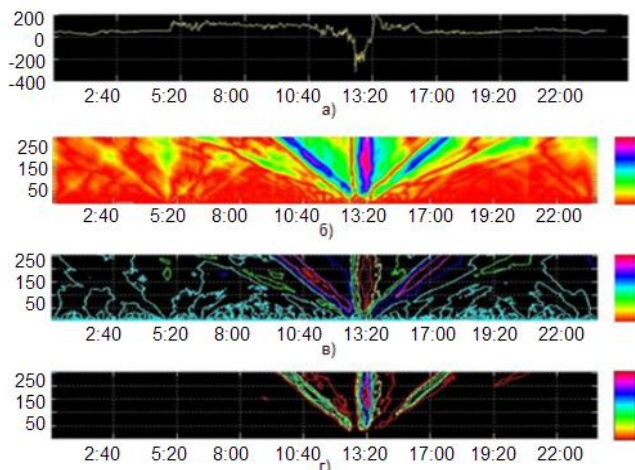


Рис. 4. Вейвлет преобразование сигнала суточного хода напряженности электрического поля за 27.07.2011 (вейвлет  $\text{bior3.3}$ ):  
 а — анализируемый сигнал, б — картина коэффициентов  $W(a,b)$ ,  
 в — изолинии коэффициентов  $W(a,b)$ , г — распределение плотности энергии  $EW(a,b)$ .

## Заключение

Таким образом, в данной работе сделана попытка, на примере данных, полученных на базе Главной Геофизической Обсерватории в п. Воейково, интерпретировать вариации электрического поля атмосферы в момент грозовой активности. Основываясь на метеорологических данных, было выделено 4 временных ряда суточного хода градиента потенциала

В ходе работы были построены картины вейвлет коэффициентов для данных временных рядов, а также картины распределения плотности энергии по этим коэффициентам с использованием 9-ти вейвлетобразующих функций: биортогональный порядка 3.3, Добеши 2-го и 4-го порядков, Гаусса 4-го порядка, «мексиканская шляпа», Мейера, Морле, Койфмана 1-го порядка и вейвлет Хаара.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для анализа данных напряженности поля в момент грозы лучше всего подходит биортогональный вейвлет порядка 3.3. На всех частотах данная вейвлетобразующая функция дает наилучшую спектрограмму сигнала. Такой вейвлет относится к классу сверхширокополосных и по своей форме подобен сигналам напряженности электрического поля, регистрируемым во время гроз. Данный факт, как уже говорилось ранее, может быть обоснован видом вейвлета, который, также как и анализируемые сигналы, является нестационарным. На рис. 3б белые полосы соответствуют частотным интервалам с максимальными значениями напряженности электрического поля, темные — частотным интервалам с минимальными значениями этой величины. На рис. 4(б) имеет место аналогичная ситуация.

Хотелось бы также отметить, что при анализе с использованием вейвлетов Мейера, Морле и Добеши 4-го спектрограммы распределения энергии наиболее полные.

Полученные предварительные результаты показали перспективность выбранного подхода для использования в задачах анализа данных атмосферного электричества. Дальнейшие исследования связаны с решением проблем интерпретации и

статистического анализа получаемых результатов после обработки большого количества экспериментальных данных.

В дальнейшем предполагается рассмотреть ряды данных уменьшив максимальное значение масштабирующего коэффициента. Это связано с тем, что при больших значениях вейвлет-спектр сильно «размыт», что мешает поиску каких-либо закономерностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Анисимов С. В., Шихова Н. М.* (2010). Перенос электричества в атмосферном слое обмена. // Геофизические исследования. Т. 11. № 1. С. 55-63.

*Астафьева Н. М.* (1996). Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. // Успехи физических наук. Т. 166. № 11. С. 1145-1170.

*Захарова Т. В., Шестаков О. В.* (2012). Вейвлет-анализ и его приложения / Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М. 158 с.

*Короновский А. А., Храмов А. Е.* (2003). Непрерывный вейвлет анализ и его приложения. // М.: Физматлит. 176 с.

*Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф.* (2007). Вейвлет-анализ модельных сигналов с особенностями. 1. Непрерывное вейвлет-преобразование // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 12. № 2. С. 182-204.

*Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф.* (2005). Фрактальные сверхширокополосные сигналы. // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 10. № 1. С. 62-84.

*Попов И. Б.* (2008). Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // Труды ГГО. Вып. 558. С. 152–161.

*Chui C. K.* (1992). An Introduction to Wavelets. Academic Press. San Diego- New-York- Boston- London-Sidney-Tokyo-Toronto. 412 p.

Wavelets and Their Applications / Coifman (ed.). Boston: Jones and Barlett Publication. 420 p.

*Combes J. M.* (1989). Wavelets. Berlin: Springer. 300 p.

*Daubechies I.* (1991). Ten Lectures on Wavelets (CBMS Lecture Notes Series); Philadelphia. 264 p.

*Mareev E. A., Sorokin A. E., Iudin D. I., Trakhengerts V. Yu., et. all.* (2003). Fine structure of thunderstorm electric field: spectra from soundings and significans for charge generation mechanisms // Proceedings of 12th International Conference of Atmospheric Electricity. Versailles 9-13 June 2003. <http://www.atmospheric-electricity.org>

## **ГРОЗЫ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРЕ — ВЕРОЯТНЫЕ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ УГРОЗЫ И РИСКИ**

*И. В. Грищенко, Т. Н. Рюмина*

Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей  
среды

163020 Архангельск, ул.Маяковского, д. 2.

E-mail: sevngmc@arh.ru,

ovenir2011@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.11.2014

Поступила после доработки 25.12.2014

### **Введение**

С наступлением теплого сезона возникают опасности, обусловленные грозовой деятельностью. Эта деятельность представляет серьезную угрозу для таких секторов экономики, как энергетика, связь, авиация, лесная отрасль, ЖКХ, а также для жизни и здоровья населения.

По оценке ООН гроза — одно из десяти наиболее серьезных опасных явлений (ОЯ), вызывающих стихийные бедствия. Каждую минуту на нашей планете происходит до 2000 гроз. Ежегодно в мире от гроз страдают свыше 10 тыс. человек (Карлин, 2006).

Грозы чрезвычайно опасны линий электропередач (ЛЭП), большая часть повреждений которых связана с ударами молний. Грозовые разряды могут вызвать аварии и выводить из строя электроподстанции, распределительные устройства, генераторы, трансформаторы и другое оборудование.

Грозовые явления создают помехи и искажения на линиях связи и могут выводить из строя приемную и передающую аппаратуру, антенное хозяйство.

Грозы представляют серьезную опасность для работы на газо- и нефтепроводах. Проводить работы при грозах на этих объектах строго запрещено.

Известны случаи аварий со значительным материальным ущербом. Так, 22 августа 2009 г. на территории нефтеперегонной станции "Конда" в 2 км от поселка Междуреченский Кондинского района Ханты-Мансийского автономного округа в результате попадания молнии загорелся один из резервуаров нефтепровода, что привело к взрыву емкости и выбросу горящей нефти на два соседних резервуара с последующим их возгоранием и взрывом. В результате пожара сгорело около 19 тыс. тонн нефти стоимостью 133 млн руб., а вместе с разрушенным оборудованием ущерб составил 145 млн руб. ([www.newsru.com](http://www.newsru.com), 2009).

Ежегодно немалые убытки приносят лесные пожары, которые могут возникать от молний уже при третьем классе горимости по шкале Нестерова, когда показатель пожарной опасности превышает 1001 °С (Методические указания, 1975). За последние 5 лет на территории Архангельской области зафиксировано 1423 пожара на площади более 66 тыс. га. При этом лесные пожары были обусловлены как природными факторами, так и человеческой деятельностью.

Практически ежегодно от гроз несет убытки и гидрометеорологическая служба — в результате грозовой деятельности выходят из строя автоматические метеорологические станции, вычислительная техника, метеорологические приборы и другое оборудование пунктов наблюдений.

### **Статистический анализ грозовой деятельности на территории Архангельской области**

Гроза представляет собой комплексное атмосферное явление, необходимой частью которого являются многократные электрические разряды между облаками или между облаком и землей (молнии), сопровождающиеся звуковым явлением — громом. При этом

одновременно могут наблюдаться сильные шквалистые ветры, ливневые осадки, град (Хромов и др., 1963).

В данной статье приведен статистический анализ дней с грозами за период 1966—2011 гг. по данным 34 метеорологических станций, расположенных на территории Архангельской области.

Грозы на территории области наблюдаются обычно с мая по сентябрь. В среднем за год фиксируется 74 дня с грозой. В период май—август грозы в Архангельской области наблюдаются ежегодно. Наибольшая повторяемость количества дней с грозой отмечается в июле (самый теплый месяц года) и составляет в среднем 22 дня (29 % от годового количества), наименьшая — в мае (14 % от годового количества).

Первые грозы, как правило, возникают в третьей декаде апреля на юге и юго-востоке области — в Котласском и Няндомском районах. За рассматриваемый период самая ранняя гроза была отмечена 20 апреля 1966 г. в Котласе. Последние грозы бывают в октябре. 10 октября 1966 г. были отмечены грозы в поселках Верхняя Тойма и Шангалы.

Синоптические условия, благоприятные для развития гроз, могут создаваться и в холодный период. Такие грозы наблюдались в марте 1984 г. и 2002 г., в ноябре 1969 г. в г. Няндомы, в марте 2000 г. — в Онеге.

К редким явлениям природы можно отнести возникновение грозы в Архангельске и Северодвинске 21 декабря 1977 г. на холодном вторичном фронте в тылу глубокого циклона. Необычное явление сопровождалось сильной метелью, по окончании которой наблюдалось полярное сияние. Возникновению зимней грозы способствовали такие факторы как открытая поверхность Двинского залива и интенсивное выпадение осадков в виде снега, которое вызвало дополнительную электризацию облаков.

Анализ пространственного распределения гроз позволил выделить однородные по числу дней зоны, которые вытянуты в почти широтном направлении (рис. 1), а именно:

зона 1—над акваторией Белого моря повторяемость дней с грозой составляет 5—7 дней/год,

зона 2 — прибрежные районы — территория Онежского, Приморского, Мезенского районов, повторяемость гроз 12—14 дней/год,

зона 3 — Пинежский, Лешуконский, Холмогорский районы, повторяемость гроз 15—17 дней/год,

зона 4 — южная половина Архангельской области, повторяемость гроз 18—21 дней/год,

зона 5 — крайний юг области, где в среднем за год наблюдается до 24 гроз.

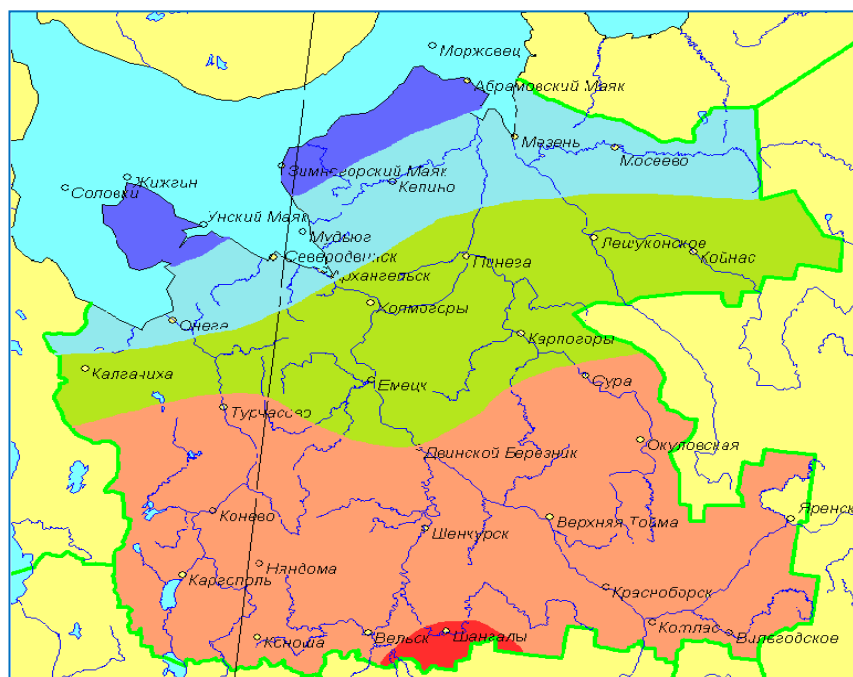


Рис. 1. Распределение повторяемости гроз по территории Архангельской области:

Принятые обозначения: 5—7 дней/год — синие, 12—14 дней/год — голубые, 15—17 дней/год — зеленые, 18—21 дней/год — розовые, 24 дня/год — красные области.

В виду того, что фиксирование грозы наблюдателем происходит только в районе метеорологической станции и это явление носит зачастую локальный характер, можно предположить, что на самом деле по территории гроз наблюдается намного больше.

Важной характеристикой является продолжительность грозы, которая напрямую зависит от синоптической ситуации. В случае возникновения внутримассовых гроз и гроз, обусловленных прохождением быстро перемещающихся фронтов окклюзии, либо холодных фронтов, продолжительность гроз составляет от нескольких минут до часа. Наиболее опасными являются ситуации, связанные со стационарными волновыми квазимеридиональными фронтами, когда в зоне фронта формируются значительные температурные градиенты. В этих случаях грозы могут отмечаться неоднократно в течение продолжительного времени.

Исследование межгодовой изменчивости числа дней с грозами показывает, что если за исследуемый период коэффициент тренда составил 0,3 дней/10лет, то в последние 20 лет появилась тенденция увеличения числа дней с грозами. Коэффициент тренда составил 4,9 дней/10 лет при  $R^2 = 0,087$  (рис. 2).

По своей природе гроза является конвективным явлением. Независимо от времени суток причиной ее возникновения является вынужденная или свободная (термическая) конвекция, поэтому температурный фон в теплый период года имеет немаловажное значение для возникновения гроз.

Мониторинг изменения климата на территории Архангельской области показывает, что отмечается тенденция повышения как средней годовой температуры воздуха, так и ее средних месячных значений. Коэффициент тренда в летние месяцы составляет 0,4—0,6 °/10 лет. Поэтому в определенной степени объяснима и тенденция увеличения числа грозовых дней.

Анализ разности между средним годовым значением дней с грозой на метеостанции и нормой ( $\Delta$ ) и среднего квадратического отклонения ( $\sigma$ ) позволил выявить годы с крупными и очень крупными аномалиями в повторяемости гроз по годам ( $\Delta \geq \sigma$ ,  $\Delta \geq 2\sigma$  и т. д.).



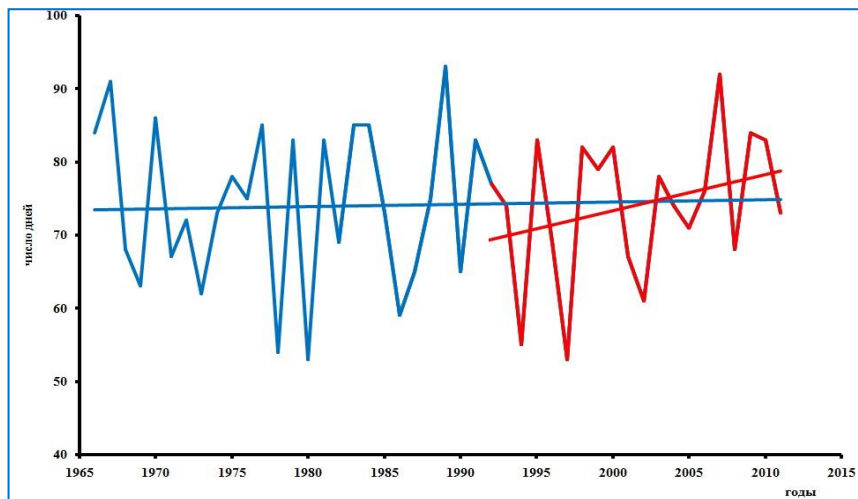


Рис. 2. Число дней с грозой на территории Архангельской области: синяя прямая — линейный тренд за период 1966—2011 гг., красная прямая — линейный тренд за период 1992—2011 гг.

Такие аномалии практически на всей рассматриваемой территории наблюдались в 1966, 1974, 1984, 1988, 1989, 2010 гг. На севере, северо-востоке области повторяемость гроз значительно превысила норму в 1967, 1977, 1981 гг., но в отдельные годы грозовая активность была пониженной (1980, 1986, 1987, 1994, 1997, 2008 гг.).

Сопутствующие грозам явления — шквалы, сильные ливни, град — могут приводить к значительным материальным потерям. Зачастую ущербы, вызванные этими явлениями, связывают с грозой, хотя непосредственные угрозы в этом случае несут электрические разряды (молнии) при попадании в объект, что может повлечь за собой взрыв, пожар, угрозу жизни людей. Вышеперечисленные характеристики гроз не дают представления о распределении ударов молний по поверхности земли, которые в немалой степени зависят от рельефа местности, наличия или отсутствия водоемов.

Количество ударов молнии, воздействующих на здания и системы энергоснабжения, а также на другие объекты зависит от размеров и особенностей этих объектов, от характеристик окружающей обстановки, а также напрямую связано с частотой возникновения грозы как природного явления на данной территории.

Эти факторы, а также тип и эффективность применяемых мер молниезащиты определяют риск воздействия молнией, которое может привести к физическому повреждению объекта, выходу из строя электрических и электронных систем, поражению людей с частичной или полной потерей здоровья. Для оценки целесообразности обеспечения молниезащиты объекта производится оценка риска согласно Международному стандарту (2006).

Оценить риск, создаваемый грозой как одним из видов опасных природных явлений, можно с помощью эмпирической методики, разработанной в ГГО (Кобышева и др., 2008) в соответствии с которой формула расчета социального риска имеет вид:

$$R_{соц} = p \cdot \frac{S_i}{S} \cdot \frac{S}{S} \cdot t \cdot m \cdot k,$$

где  $R_{соц}$  — риск для конкретного объекта,

$p$  — вероятность данного ОЯ,

$S_i$  — средняя площадь ОЯ, км<sup>2</sup>;

$S_{об.}$  — площадь объекта, км<sup>2</sup>,

$S$  — площадь территории, км<sup>2</sup>,

$t$  — время действия ОЯ,

$m$  — число жителей района,

$k$  — коэффициент агрессивности.

Такая оценка была проведена для компрессорной станции (КС) №13 газопровода Ухта-Торжок, расположенной в поселке Урдома Ленского района, как одного из потенциально опасных объектов Архангельской области. Принимая, что вероятность грозы в данной местности за теплый сезон составляет 1, повторяемость явления 19 дней/год, средняя площадь этого опасного явления 0,5 км<sup>2</sup>, территория объекта 5 км<sup>2</sup>, а территория района 10700 км<sup>2</sup>, коэффициент агрессивности 1, время действия ОЯ 1 день, число

жителей района 12254 человека, социальный риск для данного объекта составил  $5,1 \cdot 10^{-3}$ , что относится к категории чрезмерного риска (Быков и др., 2004).

Учитывая, что пропускная способность этой станции при транспортировке газа составляет 218 млн  $\text{м}^3$  /сутки, а средняя стоимость транспортируемого за рубеж газа составляет 400 долларов за  $1000 \text{ м}^3$ , возможный ущерб от воздействия грозы на данную КС можно оценить в размере 163,5 млн руб.

Снижение до минимума рисков и потерь, обусловленных грозовой деятельностью, требует выработки определенных адаптационных мер. Поэтому представляет интерес выполнение таких расчетов и оценок для каждого муниципального образования области с учетом наличия потенциально опасных объектов. На территории Архангельской области к таким объектам относятся производственные структуры лесопромышленного комплекса и добывающей отрасли.

Поскольку грозы относятся к быстротекущим природным процессам, в качестве управления риском такого рода используют прогноз этого явления с последующим принятием превентивных мер для исключения или для уменьшения возможного ущерба.

Одной из возможных мер является оборудование объектов молниезащитой и ее своевременное включение, поэтому важное значение имеет заблаговременное предупреждение о грозе синоптическими методами с учетом круглосуточного мониторинга грозовой деятельности техническими средствами.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны методы и средства защиты от последствий ударов молний. Существуют молниеотводы стержневого, тросового и сетчатого типа, а также три категории молниезащиты (I, II, III) и два типа (А, Б) зон защиты объектов от прямого удара молнии. Зона А обеспечивает перехват на пути к объекту не менее 99,5 % молний, а Б — не менее 95 %. I и II категории молниезащиты разработаны для взрывоопасных объектов и позволяют защищать их от всех четырех видов воздействия атмосферного электричества (прямые удары молнии, электростатическая и электромагнитная индукция, занос высоких потенциалов). III категория защиты разработана для пожароопасных и

высотных объектов (жилых зданий, труб, вышек, башен и т. д.) (Технический кодекс..., 2011).

Ввиду локальности гроз и быстротечности развития при этом процессов очень важен именно комплексный подход, который в настоящее время используется во всех национальных метеорологических службах.

На сегодняшний день в нашей стране в качестве технических средств используются метеорологические локаторы МРЛ-2, МРЛ-5, на смену которым приходят локаторы нового поколения — ДМРЛ-С. Метеорологические радиолокаторы позволяют образовать единую систему слежения за развитием конвективных явлений в режиме онлайн на большей части Европейской территории России.

Для фиксации фактически наблюдаемых молниевых разрядов и их характеристик, а также для повышения вероятности распознавания гроз локаторами типа ДМРЛ-С устанавливаются грозопеленгаторы.

В России сеть грозопеленгаторов начала развиваться лишь в 2004—2006 гг. (Снегуров, 2010). На территории Архангельской области пока установлены 3 аппаратно-программных комплекса (АПК) «Индикатор грозовой опасности версии Alwes 7.04» в Вельске, Емецке и Архангельске. Для сравнения стоит сказать, что система грозопеленгации была разработана и внедрена в США еще в начале 1980-х годов. Такие же системы работают в Канаде, Великобритании, Франции, ЮАР, Израиле и других странах и позволяют эффективно решать проблему снижения рисков от грозовой деятельности.

## **Заключение**

Для уменьшения рисков, а значит и ущербов, обусловленных грозовой деятельностью, необходимо дальнейшее совершенствование системы оперативного прогноза гроз, а также развитие современных технических средств для осуществления всестороннего мониторинга грозовых очагов и других конвективных явлений. Поскольку в настоящее время такой мониторинг осуществляется преимущественно визуально, фиксация явления происходит только в радиусе

непосредственного восприятия их наблюдателем метеорологической станции. Плотность наземной метеорологической сети далека от идеальной, поэтому получаемая на ней информация о грозах не является полной и достаточной для стопроцентного упреждения нежелательных последствий, вызванных попаданиями молний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Быков А. А., Акимов В. А., Фалеев М. И.* (2004). Нормативно-экономические модели управления риском. // Деловой экспресс. Т.1. № 2. С. 125—137.

*Карлин Л. Н., Абрамов В. М.* (2006). Управление энвироментальными и экологическими рисками. — Санкт-Петербург. 331 с.

*Кобышева Н. В., Галюк Л. П., Панфутова Ю. А.* (2008). Методика расчета социального и экономического рисков, создаваемых опасными явлениями погоды. // Труды ГГО. Вып. 558. С.162—171.

Международный стандарт ИЕС 62305. Часть 2. Управление риском (2006) — М.: Стандартиформ. 224 с.

Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. (1975). М.: Гидрометеиздат. 15 с.

Технический кодекс установившейся практики. ТКП 336-2011 (02230). (2011). — Минск: Минэнерго РБ. 165 с.

*Снегуров А. В.* Опыт построения экспериментальной грозопеленгационной сети. (2010) // Труды ГГО. Вып. 562. С.190—200.

*Хромов С. П., Мамонтова Л. И.* Метеорологический словарь. (1963). — Л.: Гидрометеиздат. 620 с.

Интернет-ресурс: <http://www.newsru.com/russia/25aug2009/konda.html>

## ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ВЕТРА В ТОМСКЕ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

*Л. И. Кижнер<sup>1</sup>, Н. Ю. Серая<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет

634050 Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup> ЗАМЦ Новосибирск ЗСФ ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»

630099 г. Новосибирск, ул. Депутатская, д.1

e-mail: vpgor@tpu.ru

Поступила в редакцию 12.01.2015

Поступила после доработки 2.02.2015

### Введение

Происходящие изменения климата вызывают серьезную озабоченность мирового научного сообщества, поскольку влияние этих изменений на природные, хозяйственные системы и население становится все более заметным. В этой связи изучение многолетних изменений скорости ветра имеет важное теоретическое и прикладное значение для оценки происходящих изменений в циркуляции атмосферы и для выработки рекомендаций по адаптации к этим изменениям.

Анализ многолетних изменений параметров ветра на территории России, представленный во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014), показал, что скорость приземного ветра в течение 1936—2006 гг. почти на всей территории России имела тенденцию к уменьшению при увеличении повторяемости слабого ветра и уменьшении повторяемости более сильного. По данным 1457 метеорологических станций России за 1977—2011 гг. получено, что на большей части территории России (особенно на ЕЧР и в Западной

Сибири) скорость ветра продолжает уменьшаться, особенно зимой и весной. Эта тенденция согласуется с уменьшением скорости приземного ветра на всех континентах земного шара. Исключением являются высокие широты обоих полушарий ( $\varphi \geq 75^\circ$ ), где скорость приземного ветра увеличивается. Увеличивается скорость ветра и над океанами.

Целью настоящей работы является анализ изменений скорости и направления ветра в районе г. Томска за период с 1936 по 2010 гг. с использованием за последние 10 лет данных наблюдений двух метеорологических станций.

Томск — крупный в Сибири научный и промышленный, центр, где работают предприятия энергетики, нефтегазовой, химической промышленности, развито машиностроение, производство строительных материалов. Для обеспечения нормальной работы промышленных предприятий, транспорта и комфортного проживания населения, численность которого с учетом пригородов превышает 700 тысяч жителей, необходимы не только оперативные данные о ветре, но и сведения о его изменениях за долговременный период для снижения воздействия этих изменений на экономическую деятельность (Руководство, 2008).

## 1. Исходные материалы

В работе определены основные характеристики ветра за десятилетний период (2001—2010 гг.) по данным гидрометеорологической станции Томск (ГМС Томск) и TOP-станции Института оптики атмосферы СО РАН, а также выполнено их сравнение с представленными в климатических справочниках результатами обобщений за более ранние периоды. Фактические данные о скорости и направлении ветра на ГМС Томск получены по данным (Погода в России, 2012). Станция расположена на возвышенном правом берегу реки Томь в южной части города. Место открыто с запада, юга и юго-востока. С северо-запада, севера, северо-востока станции располагаются городские строения, некоторые из которых (многоэтажные дома) были построены в конце XX века. В

последние годы плотность застройки в районе станции возросла. Высота установки датчиков на протяжении всего периода наблюдений составляла 14—17 м.

ТОР-станция расположена в северо-восточной части города в городском микрорайоне Академгородка. Измерение параметров ветра и других характеристик атмосферы выполняются на ТОР-станции с 1992 г. в рамках международной экологической программы (Аршинов и др., 1994). Особенность наблюдений на ТОР-станции заключается в том, что датчики скорости и направления ветра установлены на 10-метровой метеомачте на крыше здания, высота которого 15 метров, то есть на высоте 25 м, что выше крон деревьев примерно на 10 м.

Измерение ветра на станциях осуществляется прибором М-63 по единой стандартной методике. Расстояние между станциями составляет 6 км. Для обеих станций характерен поросший смешанным лесом холмистый рельеф.

По данным наблюдений за 2001—2010 гг. была проведена оценка расхождений в показаниях датчиков рассматриваемых станций, обусловленного различиями в высоте установки приборов и местоположением. Результаты представлены в табл. 1, в соответствии с которой в большинстве случаев скорость ветра на ТОР-станции превышает скорость ветра на ГМС. Различие между средними скоростями составило 0,3 м/с, при этом средняя разность между единичными значениями скорости ветра на двух станциях не превышает 1 м/с. Аналогичные выводы были получены в Обнинске: на высоте 25 м скорость может возрастать в среднем на 30 % по сравнению с уровнем 9 м. Направление ветра в этом слое не изменяется (Комаров и др., 2008).

Для каждой станции были рассчитаны основные климатические характеристики. При контроле фактических данных были исключены заведомо ошибочные (когда скорость ветра отрицательная или больше 50 м/с). При оценке изменений характеристик ветра за рассматриваемый период использовались данные Справочников (Справочник, 1966; Научно-прикладной справочник, 1993). В первом источнике обобщены данные с 1936 по 1960 гг., во втором — с 1966 по 1980 гг. Расчет повторяемости направлений ветра и штилей проводился в соответствии с общепринятой методикой (Дроздов и др., 1989).



**Результаты сравнения средней скорости ветра ( $V$  м/с)  
на ГМС Томск и ТОР-станции**

Параметр	Значение
$V_{\text{ГМС}}$ , м/с	1,8
$V_{\text{ТОР}}$ , м/с	2,1
$\Delta =  V_{\text{ГМС}} - V_{\text{ТОР}} $	0,7
$P_{V_{\text{ГМС}} > V_{\text{ТОР}}}$ , %	21
$P_{V_{\text{ГМС}} < V_{\text{ТОР}}}$ , %	79

## 2. Характеристики ветра в современный период

В табл. 2—4 представлены данные о скорости и направлении ветра для обеих станций.

В связи с особенностями циркуляции атмосферы и под влиянием местных условий (Кошинский и др., 1982; Серая и др., 2012) в Томске в течение всего года преобладают южные и юго-западные ветры; летом уменьшается повторяемость южных и возрастает повторяемость северных ветров (СВ и СЗ). Повторяемость северных и северо-западных направлений относительно невелика по месяцам и за год.

В то же время на ГМС больше повторяемость северного и юго-западного направлений и меньше — восточного, юго-восточного, южного направлений.

В табл. 3 приведены обобщенные данные по среднемесячным значениям скорости ветра на станциях за весь период наблюдений.

Из таблицы следует, что различия в среднемесячных скоростях ветра на двух станциях составляют 0,3—0,7 м/с при незначительном превышении их на ТОР-станции. В целом можно считать данные соизмеримыми и идентичными.

Если рассматривать по годам, то среднемесячные скорости ветра на ГМС не превышают 2,7 м/с, на ТОР-станции — 3,2 м/с. Несколько большие скорости ветра отмечаются холодное время года.

Таблица 2

## Повторяемость (%) направлений ветра

Направление ветра	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
С	2/2	4/2	4/1	11/3	13/4	12/5	15/4	12/5	9/3	6/2	7/1	5/3	8/3
СВ	8/5	12/8	7/5	10/10	9/8	10/9	16/15	15/15	10/10	5/5	11/7	8/5	10/8
В	8/13	7/11	8/12	7/11	5/13	5/14	5/18	6/16	5/10	4/12	7/11	7/14	6/12
ЮВ	2/14	1/13	1/14	2/11	2/12	7/16	10/14	8/13	8/12	4/13	4/13	1/15	4/13
Ю	22/40	19/37	26/32	17/23	19/19	20/20	16/15	14/17	20/26	18/26	16/29	22/37	19/27
ЮЗ	50/16	49/18	40/23	31/21	21/18	15/16	11/13	16/15	15/21	36/23	39/21	45/16	31/19
З	4/7	4/8	9/10	11/15	17/17	17/12	12/11	16/14	20/11	18/14	12/12	7/6	12/12
СЗ	3/3	3/3	4/3	9/6	11/9	9/8	9/9	12/8	10/7	7/5	5/6	3/4	7/6

Примечание.

Числитель — данные ГМС Томск, знаменатель — ТОР-станция.

Среднегодовые скорости ветра от года к году различаются не более чем на 0,5 м/с. За рассматриваемый период отмечается тенденция постепенно уменьшается среднегодовой скорости ветра.

Таблица 3

**Средняя месячная и годовая скорость ветра**

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
ГМС	1,7	1,8	1,8	1,8	1,7	1,4	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,6
ТОР	2,4	2,4	2,5	2,3	2,1	1,7	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,4	2,1

В связи с отсутствием в нашем распоряжении данных по максимальной скорости ветра на ГМС Томск в табл. 4 приведены результаты расчетов только для ТОР-станции.

По данным ТОР-станции зафиксированы лишь отдельные случаи появления сильного ветра ( $\geq 15$  м/с). За рассмотренный период несколько большая повторяемость сильных ветров отмечалась в декабре. Следует отметить существенную разницу в повторяемости сильных ветров от года к году: в 2002 г. наблюдалось 28 дней с сильным ветром, в 2009 г. — сильный ветер не наблюдался.

Таблица 4

**Среднее число дней с сильным ветром ( $\geq 15$  м/с), средний и абсолютный максимум скорости ветра**

Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
Число дней с сильным ветром	0,2	0,1	0,5	0,1	0,2	0,1	0,2	0,0	0,5	0,5	0,1	2,0	4,5
Средняя максимальная скорость ветра, м/с	4,7	4,6	5,2	4,8	4,6	3,8	3,4	3,8	4,5	5,2	5,2	4,8	4,5
Максимальная скорость ветра, м/с	27	22	29	15	24	26	18	15	17	17	16	30	30

За десятилетний период средняя максимальная скорость ветра в большинстве случаев составляет 4—6 м/с. Наибольшие скорости ветра

отмечались в 2002 году. За этот же период в 80 % месяцев абсолютная скорость ветра не превышала 15 м/с. Максимальная зафиксированная скорость ветра в срок наблюдений составила 30 м/с (декабрь 2007 г.).

### 3. Изменения ветрового режима за долговременный период

*Направление ветра.* С учетом имеющихся особенностей наблюдений на ГМС и ТОР-станции и по результатам наблюдений можно считать, что данные по обеим станциям могут быть сравнимы между собой. На рис. 1 представлена повторяемость направлений ветра за 3 периода наблюдений.

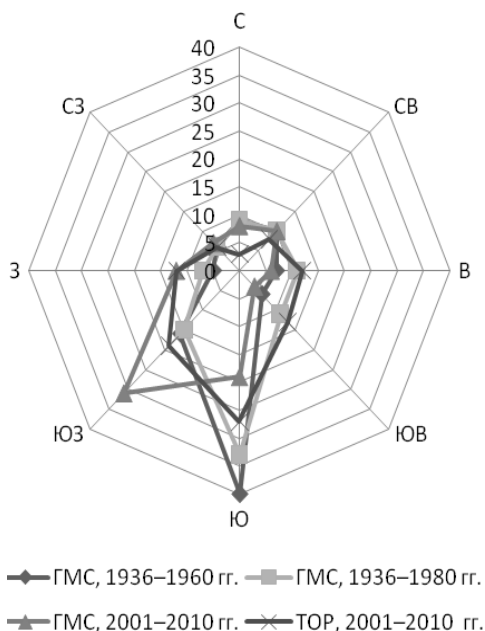


Рис. 1. Среднегодовая повторяемость направлений ветра за разные периоды.

Сравнение данных по направлению ветра на двух станциях показало, что в последние годы на ГМС преобладает юго-западный

ветер, на ТОР-станции, как и за предыдущие периоды, преобладает южный ветер. Повторяемость других направлений существенно не изменилась. При этом наименьшие изменения в повторяемости характерны для северной четверти (С, СВ, СЗ). Что касается восточного и юго-восточного направлений, то данные ГМС и ТОР-станции дают противоположный результат. В начале XXI в. увеличилась повторяемость западных ветров. Повторяемость южного ветра по данным обеих станций постепенно уменьшается.

*Повторяемость штилей* представлена в табл. 5. За все рассмотренные периоды повторяемость штилей не превышает 25 % и несколько возрастает в теплый период года (май—сентябрь). В последнее десятилетие на ГМС Томск повторяемость штилей увеличилась.

*Среднемесячная скорость ветра.* Многолетние изменения этой характеристики представлены на рис. 2.

При уменьшении средней скорости ветра во все сезоны года в XXI веке существенно уменьшилось число дней с сильным ветром, особенно в холодное время года (рис. 3). Если в XX веке четко прослеживалось увеличение числа дней с сильным ветром в холодную часть года, то в начале XXI века только в декабре отмечается повышенная повторяемость сильного ветра, соизмеримая с предыдущими периодами.

Таблица 5

**Повторяемость штилей (%) за разные временные интервалы**

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
<i>ГМС Томск</i>													
1936—1960 гг.	9	7	8	9	8	9	12	14	10	7	6	8	8,9
1966—1980 гг.	7	10	8	6	8	12	17	16	17	13	12	11	11,4
2001—2010 гг.	20	13	10	11	14	22	24	24	24	21	12	15	18,0
<i>ТОР-станция</i>													
2001—2010 гг.	12	9	6	7	12	19	21	19	15	10	9	9	12,3

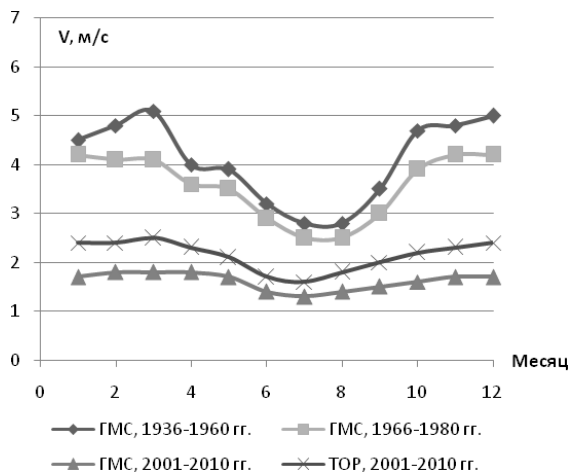


Рис. 2. Сравнительные данные по среднемесячной скорости ветра за различные периоды.

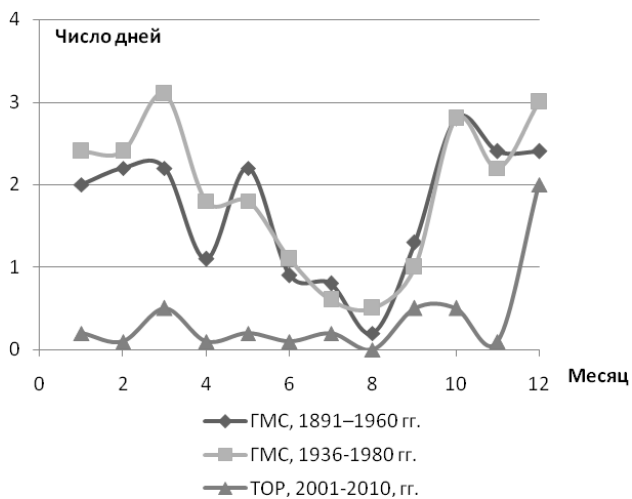


Рис. 3. Сравнительные данные по среднему числу дней с сильным ветром ( $\geq 15$  м/с).

Характеристики изменчивости средних месячных скоростей ветра приведены в табл. 6, из которой следует, что в целом с уменьшением скорости ветра уменьшается среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ) и коэффициент вариации ( $v$ ).

В работе выполнена оценка однородности рядов скорости ветра за периоды 1936—1980, 2001—2010 гг. (по ТОР-станции). Оценка проведена по дисперсии и средним значениям скорости ветра за январь, апрель, июль и октябрь с использованием критериев Фишера и Стьюдента. Получено, что на уровне значимости 0,05 за эти месяцы ряды по скорости ветра не являются однородными. Следовательно, можно говорить о статистически значимом уменьшении скорости ветра в XXI веке.

Таблица 6

**Характеристики изменчивости скорости ветра в центральные месяцы сезонов**

Период	$\sigma$ , м/с				$v$ , %			
	I	IV	VII	X	I	IV	VII	X
	<i>ГМС Томск</i>							
1936—1980	1,2	1,0	0,7	1,3	29	28	28	33
2001—2010	0,4	0,2	0,1	0,2	26	12	6	10
	<i>ТОР-станция</i>							
2001—2010	0,5	0,2	0,1	0,4	19	11	8	18

**Выводы**

В работе рассчитаны и проанализированы основные характеристики ветрового режима для Томска. Выполнено сравнение характеристик ветра на ст. Томск за два периода наблюдений XX века, за 10 лет XXI века по ГМС Томск и за тот же период по ТОР-станции. С учетом особенностей наблюдений, были получены следующие выводы для района г. Томска:

1) за долговременный период обнаружено статистически значимое уменьшение среднемесячной и среднегодовой скорости ветра, количества дней с сильным ветром, максимальных скоростей ветра. Сильные ветры, наблюдаемые ранее в переходные сезоны, практически не наблюдаются или наблюдаются не более одного раза за сезон. Уменьшилось также среднее квадратическое отклонение скорости ветра и коэффициент вариации;

2) отмечено постепенное увеличение повторяемости штилей;

3) преобладающее направление ветра не изменилось и осталось южным, хотя при этом в XXI в. усилились западная и юго-западная составляющие;

4) повторяемость южного ветра постепенно уменьшается;

5) сравнение данных двух станций позволяет предполагать, что причиной изменения характера ветра является не застройка района метеостанции, а объективные причины, связанные с изменением циркуляции атмосферы;

6) в годовом ходе скорость ветра не претерпела изменений: максимум отмечается в ноябре—марте, минимум — в июле—августе.

Постепенное снижение скорости ветра в районе Томска подтверждает общую закономерность многолетних изменений скорости ветра, характерную для большей части территории РФ. Эти изменения, возможно, обусловлены наличием вековой климатической изменчивости макромасштабной атмосферной циркуляции. На основе изменений повторяемости разных направлений ветра можно предположить об уменьшении меридиональной циркуляции.

Уменьшение максимальных скоростей в указанный период может быть результатом ослабления общей циркуляции атмосферы, претерпевавшей на протяжении столетия значительные изменения, например заметное уменьшение атмосферных барических градиентов.

Постепенное уменьшение скорости ветра может способствовать ухудшению экологической обстановки в районе г. Томска.

Все рассчитанные характеристики ветра имеют важное значение для адаптации к изменению регионального климата.



*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 5.628.2014/К.*

*Авторы выражают благодарность доктору физ.-мат. наук, руководителю лаборатории климатологии атмосферного состава ИОА СО РАН Б. Д. Белану за предоставление данных и старшему научному сотруднику лаборатории Т. М. Рассказчиковой за консультацию при выполнении работы.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Аришинов М. Ю., Белан Б. Д., Зуев В. В., Зуев В. Е., Ковалевский В. К., Лиготский А. В., Мелешкин В. Е., Панченко М. В., Покровский Е. В., Рогов А. Н., Симоненков Д. В., Толмачев Г. Н. (1994). ТОР-станция мониторинга атмосферных параметров // Оптика атмосферы и океана. Т. 7. № 8. С. 1085—1092.*

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. (2014) — М.: Росгидромет. 61 с.

*Журавлев Г. Г. (2013). Динамика метелей Томской области в современный период // Вестник ТГУ. Вып. 369. С. 181—187.*

*Дроздов О. А., Васильев В. А., Кобышева Н. В., Раевский А. Н., Смекалова Л. К., Школьный Е. П. (1989). Климатология. — Л.: Гидрометеиздат. 568 с.*

*Комаров В. С., Ломакина Н. Я. (2008). Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири. — Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 222 с.*

*Кошинский С. Д., Трифонова Л. И., Швер Ц. А. (1982). Климат Томска. — Л.: Гидрометеиздат. 176 с.*

Научно-прикладной справочник по климату СССР. (1993). Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. — Спб.: Гидрометеиздат. 717 с.

Погода в России и мире, прогноз погоды от Метеоцентра [Электронный ресурс] / Гидрометцентр России. — URL: <http://meteocenter.net> (дата обращения 15.03.2012).

Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики (2008) / Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб.: Гидрометеиздат. 336 с.

*Серая Н. Ю., Кижнер Л. И. Многолетние изменения ветра в г. Томске. (2012). / В сб. Климатология и гляциология Сибири: материалы межд. научно-практической конф. Томск, 16–20 октября 2012 г. — Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. С. 276—278.*

*Справочник по климату СССР. (1966). Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. Ч. 3. Ветер. — Л.: Гидрометеиздат. 323 с.*

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРА В ДНИ ПЕРЕНОСА ПУСКОВ  
РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ  
НА КОСМОДРОМЕ «БАЙКОНУР»**

*О. И. Золотухина<sup>1,2</sup>, В. П. Горбатенко<sup>1</sup>, П. А. Вареник<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский Государственный Университет  
634050 Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup>Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» — «Космический центр «Южный»  
468320 Байконур, ул. Титова, 9.  
e-mail: vpgor@tpu.ru; zolot\_o@sibmail.com

Поступила в редакцию 12.01.2015  
Поступила после доработки 5.02.2015

Происходящие современные изменения глобального и регионального климата обуславливают необходимость пересмотра климатических норм во многих отраслях хозяйственной деятельности. Недостаточная изученность причин и пространственно-временных закономерностей происходящих изменений как климата регионов в целом, так и отдельных его характеристик закладывают элемент неопределенности при планировании любых работ, так или иначе зависящих от погоды или климата.

Согласно статистике на космодромах «Байконур» и «Плесецк» не реже, чем раз в пять лет переносятся пуски ракет космического назначения (РКН) по метеорологическим условиям. В тоже время значения метеорологических параметров близких к критическим, установленным эксплуатационной документацией на каждое конкретное изделие, при которых требуется проведение детального моделирования поведения РКН в полете, фиксируются 5—7 раз в год.

Параметры ветра у поверхности земли и в свободной атмосфере, а также явления погоды, связанные с развитием конвекции, могут оказать существенное влияние на ход выполнения работ в период

подготовки РКН на стартовом комплексе, на проведение пуска РКН , на ее полет на активном участке. Вышеуказанные параметры определены в эксплуатационной документации на каждую РКН как критические, поскольку финансовые затраты, связанные с переносом времени старта РКН значительны.

Целью настоящей работы является изучение погодных условий и выявление наиболее общих закономерностей ветрового режима, неблагоприятных для пуска РКН на космодроме «Байконур».

Заметим, что климатические характеристики ветра над изучаемой территорией исследовались в ряде работ, но достаточно давно и в несколько в других аспектах (Лутфиев 1988; Чередниченко, 1976). Согласно данным научно-прикладного справочника по климату скорости ветра, превышающие 30 м/с, у земли над территорией старта РКН встречаются не чаще одного раза в десять лет (Научно-прикладной справочник, 1989). Характеристики тропопаузы и ветер на высотах над территорией Казахстана также изучались достаточно детально (Тропопауза., 1975). Были обнаружены их значительные пространственные неоднородности над исследуемой территорией. Кроме того, было замечено, что летом положение изотерм тропопаузы часто близко к зональному, а наибольшие градиенты температуры наблюдаются в августе. Известно (Чередниченко, 1992), что амплитуда годового хода максимальных скоростей ветра наименьшая вдоль линии Актюбинск — Балхаш (6 м/с). К северо-востоку и к юго-западу от этой линии она плавно увеличивается до 12 м/с над г. Семипалатинск и 16 м/с — над г. Атырау. Над северо-восточной частью Казахстана максимальные скорости отмечаются зимой, а над юго-востоком — летом. Поскольку исследуемая территория расположена в стороне от линии малых амплитуд годового хода максимальной скорости ветра и имеет место сезонная неопределенность его появления, применение климатического прогноза для заблаговременного планирования времени старта РКН затруднено.

Для данной работы были детально изучены метеорологические условия и основные элементы погоды в дни переносов стартов РКН. Для анализа были выбраны четыре случая переноса пуска РКН на

космодроме «Байконур», случившиеся в разное время года, которым для удобства присвоим порядковые номера: 1, 2, 3 и 4 и сохраним их на протяжении всего исследования.

Поскольку анализ критических характеристик ветра невозможен без анализа синоптической обстановки над обслуживаемой территорией, динамика синоптических процессов исследовалась с заблаговременностью двух дней до старта РКН во всех рассматриваемых случаях.

*Случай 1.* За два дня до старта в районе стартового комплекса метеорологические условия приземного слоя обуславливались влиянием центральной части антициклона с давлением в центре 1032,6 гПа. У поверхности земли преобладали ветры северного направления со скоростью 4—7 м/с. На изобарической поверхности 500 мбар территория стартового комплекса находилась под влиянием тыловой части ложбины циклона с центром в районе Омска (высота изобарической поверхности, далее геопотенциал, в центре — 537 гп. дам), над стартовым комплексом преобладали потоки воздушных масс северо-западного направления.

За день до старта в приземном слое произошло смещение центра антициклона в район озера Тениз (давление в центре составляло 1037,8 гПа), и метеорологические условия в районе стартового комплекса стали обуславливаться периферией антициклона. Направление ветра в связи с перемещением антициклона сменилось на юго-западное. Высотный циклон в это время сместился на северо-восток, перемещение оси ложбины в восточном направлении происходило со скоростью около 30 км/ч. С запада вслед уходящему циклону сместился гребень, ось которого протянулась от Еревана до Самары. Район стартового комплекса оказался под влиянием передней части высотного гребня, северо-западное направление перемещения воздушной массы сохранялось.

В день старта метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись повышением давления в центре антициклона, который сместился в район Усть-Каменогорска (давление в центре составляло 1045,7 гПа). При этом гребень антициклона продвинулся на территорию Урала и Поволжья. У поверхности земли наблюдалось

преобладание ветров юго-западного направления. Высотный гребень сменила ложбина, перемещавшаяся со скоростью около 60 км/ч. Ось ложбины располагалась по направлению Москва — Ростов-на-Дону, а ее центр в районе Архангельска (геопотенциал в центре — 516 гп. дам). При этом сформировались высокие градиенты геопотенциала (4 гп. дам на 100 км), а направление перемещения воздушной массы с северо-западного сменилось на юго-западное.

*Случай 2.* За два дня до старта в районе стартового комплекса метеорологические условия приземного слоя определялись тыловой частью ложбины циклона. На изобарической поверхности 500 мбар метеорологические условия характеризовались передней частью ложбины циклона с центром в районе Новой Земли. Район стартового комплекса находился в зоне сгущения изогипс (4 гп. дам на 100 км), преобладало западное направление перемещения воздушной массы.

За день до старта РКН метеорологические условия определялись влиянием тыловой части ложбины. Высотный циклон сохранил свое положение в районе Новой Земли, еще один образовался в районе Новосибирской области, при этом градиенты геопотенциала снизились до 2 гп. дам на 100 км, а область сгущения изогипс переместилась на 200 км к югу, западное направление перемещения воздушной массы сохранилось.

В день старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись влиянием ложбины циклона. Высотная ложбина переместилась на восток в район Абакана, вслед за ней в район стартового комплекса сместился деформационный гребень, направление перемещения воздушной массы изменилось на северо-западное.

*Случай 3.* В приземном слое метеорологические условия в районе стартового комплекса за два дня до старта РКН определялись тыловой частью ложбины циклона, центр которого располагался в районе Омска. На изобарической поверхности 500 мбар район стартового комплекса находился под влиянием ложбины циклона, центр которого находился в районе Тюмени, над стартовым комплексом преобладали потоки западного направления и наблюдалась зона с высокими (6 гп. дам на 100 км) градиентами геопотенциала.

За день до старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись сменой барических образований: ложбина циклона смещалась в юго-западном направлении со скоростью около 40 км/ч, ей на смену в район стартового комплекса перемещался антициклон. На изобарической поверхности 500 мбар территория стартового комплекса оставалась под влиянием квазистационарного циклона, центр которого находился в районе Тюмени. Направление перемещения воздушной массы изменилось с западного на северо-западное, зона с высокими (6 гп. дам на 100 км) градиентами геопотенциала над районом стартового комплекса сохранилась.

В день старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись западной периферией антициклона. Высотная зона с высокими градиентами геопотенциала сохранилась, но значения градиентов снизились до 5 гп. дам на 100 км. Направление перемещения воздушной массы изменилось на юго-западное.

*Случай 4.* В приземном слое за два дня до старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса обуславливались зоной малоградиентного барического поля пониженного давления. На изобарической поверхности 500 мбар территория стартового комплекса находилась под влиянием оси ложбины циклона, центр которого располагался над Новой Землей. При этом над территорией стартового комплекса сформировались высокие (4 гп. дам на 100 км) градиенты геопотенциала, направление перемещения воздушной массы – западное.

За день до старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса обуславливались малоградиентным барическим полем пониженного давления. Высотная ложбина сохранялась. Градиенты геопотенциала усилились до 6 гп. дам на 100 км, направление перемещения воздушной массы изменилось на юго-западное.

В день старта метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись тыловой частью ложбины циклона, центр которого располагался в районе Монголии. На изобарической

поверхности 500 мбар территория стартового комплекса находилась под влиянием оси ложбины, которая переместилась в восточном направлении на 320 км, направление перемещения воздушной массы приобрело северо-западную составляющую, зона с высокими (6 гп. дам на 100 км) градиентами геопотенциала сохранялась.

Анализ метеорологических условий, при которых параметры ветра достигли критичных значений, показал, что во всех рассматриваемых случаях усиление скоростей ветра происходило в результате достаточно быстрой смены циклонической циркуляции на антициклональную. Преобладающим типом циркуляции атмосферы были северо-западные европейские вторжения. При этом центры барических образований перемещались со скоростями превышающими средние значения. Во все дни было зафиксировано наличие струйного течения — высоко градиентной зоны вблизи полярной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ). Причем во всех исследуемых случаях исследуемая территория была расположена с циклонической стороны от оси струйного течения, где и следовало ожидать наибольших горизонтальных сдвигов ветра.

Анализ характеристик ветра и их изменчивости у поверхности земли осуществляется постоянно в период подготовки и пуска РКН. В соответствии с классическими методиками на рис.1 представлена изменчивость направления ветра в течение суток до пуска РКН (Гутерман, 1965; Орленко, 1979).

В первом случае переноса старта РКН у поверхности земли наблюдалось преобладание ветра ЮВ направления, во втором и четвертом случаях — преобладание ветра СВ направления, в третьем случае — преобладание ветра ЮЗ направления. В целом направление ветра в течение суток во всех случаях было достаточно устойчивым, выявить сезонную зависимость направления ветра на данном материале не представляется возможным.

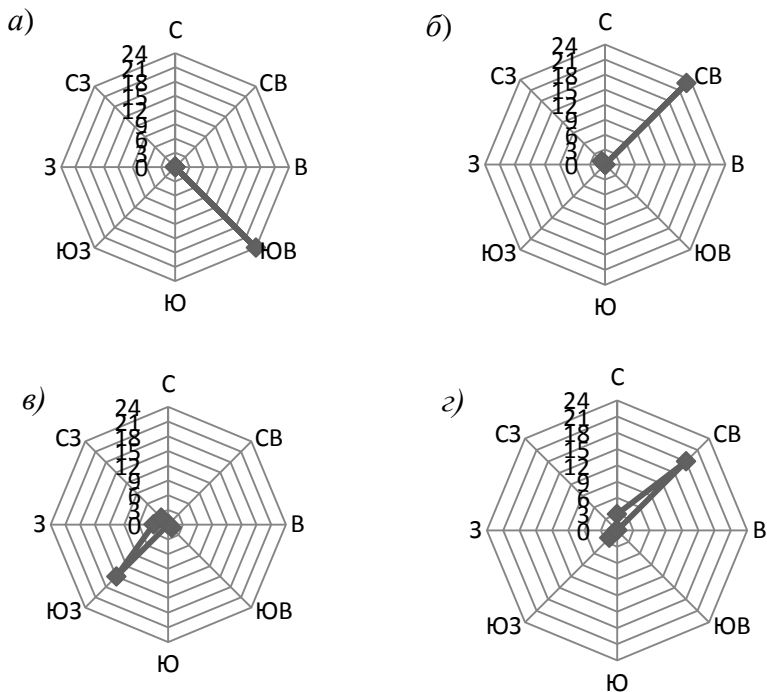


Рис. 1. Направление ветра у поверхности земли в течение суток для каждого из случаев переноса пуска РКН:  
*a* — случай 1, *б*— случай 2, *в* — случай 3, *г*— случай 4.

Поскольку при подготовке РКН в стартовый день проводится комплексное радиозондирование атмосферы имеется возможность проследить изменения скорости ветра с высотой. На рис. 2 приведены вертикальные профили скорости ветра по данным радиозондирования атмосферы в соответствии с общепринятыми методиками их представления (Гарифулин, 1967). Зависимости величины максимальной скорости ветра от уровня его расположения обнаружить не удалось. В рассматриваемых случаях максимальные скорости ветра колебались от 30 м/с до 52 м/с и наблюдались на высотах 10—12 км. Высокие значения скорости ветра фиксировались на высотах 10—16 км в слое толщиной от 2 до 5 км. При этом



соблюдалась зависимость: чем больше максимальная скорость ветра, тем более протяженным по вертикали был слой, в котором ветер со скоростью более 30 м/с регистрировался. Толщина этого слоя, несомненно, зависит от времени года, однако для данного исследования не принципиальна.

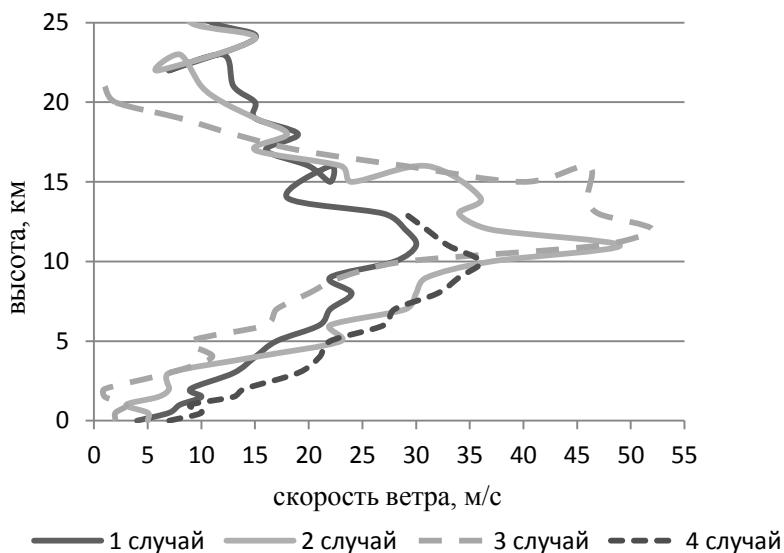


Рис. 2. Изменение скорости ветра с высотой.

Направление ветра при максимальных скоростях в каждом из рассматриваемых случаев было следующим:

- в первом случае при максимальной скорости ветра 30 м/с, на высоте 11 км наблюдалось СЗ направление;
- во втором случае при максимальной скорости ветра 49 м/с, на высоте 11 км наблюдалось ЮЗ направление;
- в третьем случае при максимальной скорости ветра 52 м/с на высоте 12 км наблюдалось ЮЗ направление,

- при четвертом случае при максимальной скорости ветра 36 м/с на высоте 10 км наблюдалось СЗ направление.

Можно заметить, что при ЮЗ направлении максимальная скорость ветра, в 1,5 и более раз превышающая нижнее значение скорости ветра на оси струйного течения (30 м/с), была зарегистрирована в теплый период года.

На рис. 3 представлены данные об изменении направления ветра до высоты 25 км. Повторяемость регистрации радиозондами преобладающего направления ветра на высотах в процентном соотношении выглядит следующим образом:

- в первом случае преобладание СЗ ветра зарегистрировано в 46 % измерений,
- во втором случае преобладание ЮЗ ветра отмечалось в 85 % случаев,
- в третьем случае преобладание ЮЗ ветра регистрировалось в 80 % случаев,
- в четвертом случае преобладание СЗ ветра зафиксировано в 63 % случаев.

Таким образом, в случае юго-западных переносов, наблюдавшихся в теплое полугодие, направление ветра во всей толще исследуемого слоя было относительно устойчивым, а в случае СЗ направление ветра менялось. В связи с этим представляет интерес рассмотреть изменение направления ветра в зависимости от высоты.

На рис. 4 представлены данные о повороте ветра в градусах (°) в зависимости от высоты (по данным радиозонда). Максимальный поворот ветра вне зависимости от сезона года наблюдался в слое от 1 до 3 км:

- в первом случае поворот ветра составил 65°,
- во втором случае максимальный поворот ветра достиг 83°,
- в третьем случае максимальный поворот произошел на 64°;

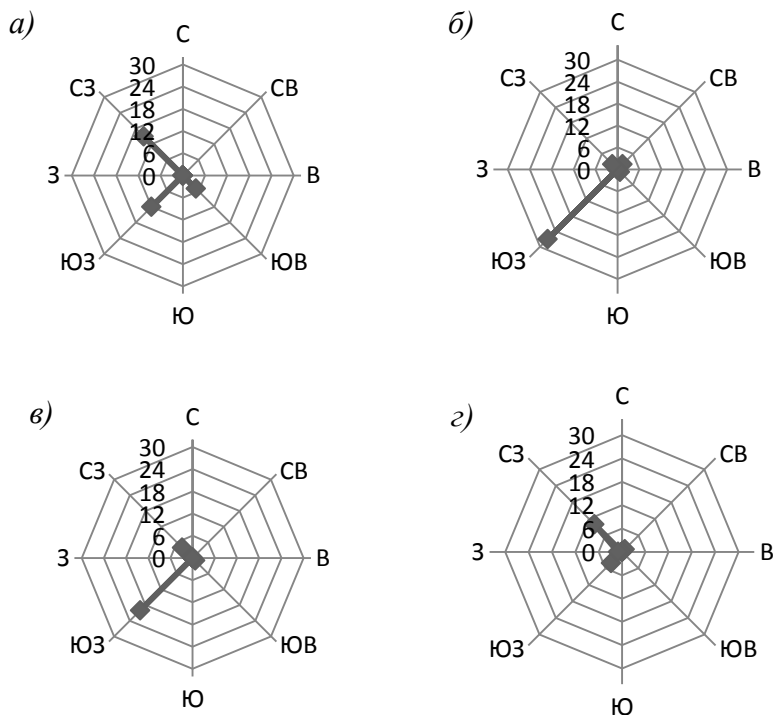


Рис. 3. Преобладающее направление ветра в слое от 0,5 до 25 км:  
*а* — случай 1, *б* — случай 2, *в* — случай 3, *г* — случай 4.  
 По шкале отложено число замеров ветра в рассматриваемом слое.

- в четвертом случае ветер был достаточно устойчив в течение всего полета радиозонда и менял направление в пределах не превышающих  $25^\circ$ .

Известно, что в области струйного течения велики как вертикальные, так и горизонтальные сдвиги ветра. Причем горизонтальный сдвиг ветра слева от оси струйного течения, т. е. на циклонической стороне, гораздо больше, чем справа от нее, на антициклонической стороне. Поскольку интересующий нас район в каждом из рассмотренных случаев был расположен на циклонической

стороне струйного течения, представляется возможным оценить значения сдвига ветра в дни переноса пусков.

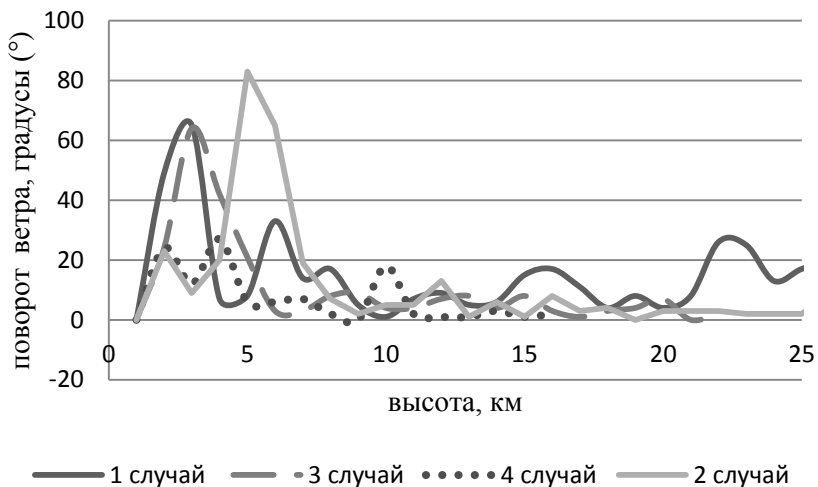


Рис.4. Поворот ветра в слое от земли до 25 км.

Сдвиг ветра, представляющий собой изменение вектора ветра от одной точки пространства до другой, выражается разностью между векторами ветра в двух точках. Интенсивность сдвига ветра рассчитывается путем деления разности между векторами в двух точках на расстояние между ними. Рассчитаем сдвиг ветра по формуле (1):

$$\rho = \frac{\Delta V}{\Delta Z} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_1^2 - 2V_1 V_2 \cos \alpha}}{\Delta Z}, \quad (1)$$

где  $V_1$  — скорость ветра в нижней точке, м/с;

$V_2$  — скорость ветра в верхней точке, м/с;

$\alpha$  — угол между верхней и нижней точками;

$\Delta z$  — расстояние между рассматриваемыми точками, м.

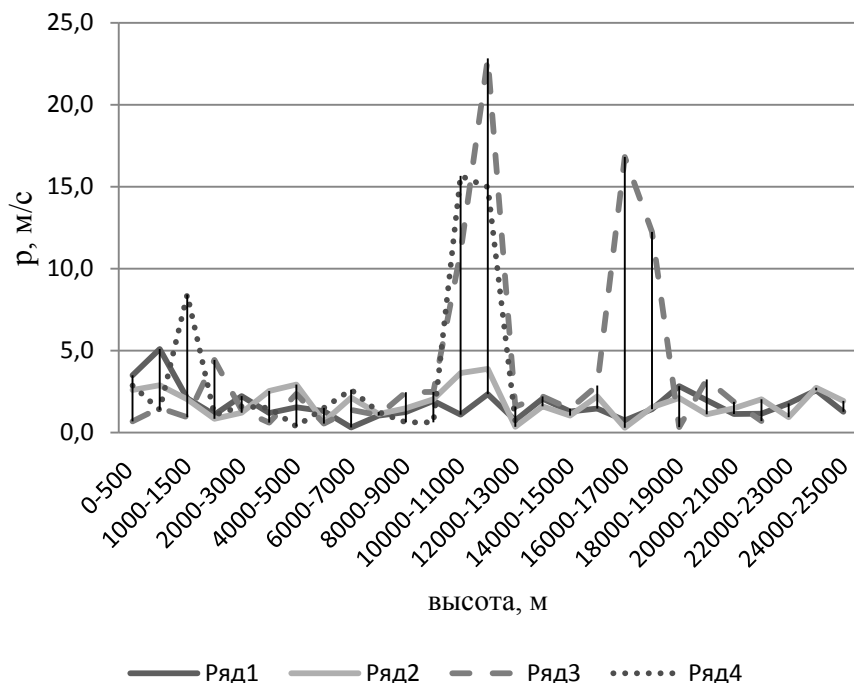


Рис. 5. Распределение интенсивности сдвига ветра на высотах.

Интенсивность сдвига ветра в анализируемые дни была определена по методике Глазунова В. Г. (Расследование..., 2009). На рис. 5 представлено распределение сдвига ветра с высотой в интересующие нас дни. Как и ожидалось, значения сдвига ветра привязаны к высотам, на которых наблюдались максимальные скорости ветра, и расположены на высотах 10—12 км. Выявлено наличие сильных сдвигов (изменение вертикального сдвига ветра от 2,5 до 5 м/с на каждые 300 м), и очень сильных (изменение вертикального сдвига ветра на каждые 300 м от 5 до 10 м/с).

Чем сильнее струйное течение, тем больше вертикальный сдвиг ветра в нем. Рассмотрим случай 3, при котором в слое 10—12 км наблюдались максимальные скорости ветра 52 м/с. Градиенты геопотенциала были высокими и составляли 5 гп. дам на 100 км. При

этом средний вертикальный сдвиг ветра на 1 км в слое 0,5—25 км составлял 12,8 м/с, максимальный вертикальный сдвиг ветра в слое 11—12 км достигал 55,3 м/с.

В табл. 1 приведены обобщенные характеристики ветра, наблюдавшиеся в рассмотренных выше случаях переносов пусков РКН.

*Таблица 1*

**Обобщенные характеристики ветра для случаев переноса пусков РКН**

Характеристика ветра	Результат
Преобладающее направление ветра: у поверхности земли	СВ
в слое от земли до 29 км	СЗ
Направление ветра при максимальной скорости	СЗ
Высота, на которой наблюдались максимальные скорости ветра, км	10—12
Слой, в котором наблюдались очень сильные сдвиги ветра, км	10—12
Слой, в котором наблюдался максимальный поворот ветра, км	1—3

**Выводы**

1. При комплексном обзоре синоптической обстановки в районе стартового комплекса в независимости от сезона года наибольшее внимание следует уделять СЗ европейскому вторжению, на фоне которого формируется ПВФЗ и струйное течение с критическими значениями характеристик ветра.

2. Высокие скорости ветра замечены при преобладании в холодное полугодие СЗ, а в теплое — ЮЗ направлений ветра во всей толще тропосферы.

3. При преобладании в тропосфере ЮЗ переносов воздушной массы максимальные скорости ветра в области струйных течений в 1,5 раза больше, чем при СЗ, и имеют, по-видимому, сезонный ход.

4. Максимальные скорости и сдвиг ветра наблюдаются в слое 10—12 км.

5. В исследуемом районе вне зависимости от времени года при определенных условиях формируются как сильные, так и очень сильные сдвиги ветра, опасные для пусков РКН. Для определения их средних характеристик необходимы дополнительные исследования.

*Результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (№ 5.628.2014/К).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Гарифулин К. К.* (1967). Изменчивость ветра в свободной атмосфере. — Л.: Гидрометеоиздат. 141 с.

*Гутерман И. Г.* (1965). Распределение ветра над северным полушарием. — Л.: Гидрометеоиздат. 250 с.

*Лутфиев Х. Л.* (1988). Вертикальные сдвиги ветра на территории Средней Азии. // Труды СЛШГШ. Вып. 130. С. 63—65.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 18. Казахская ССР. Книга 2. Части 1-6. (1989). — Л.: Гидрометеоиздат. 440 с.

*Орленко Л. Р.* (1979). Строение пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат. 167 с.

Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанными с метеорологическими факторами. (2009). // Методическое пособие. Третье издание, переработанное и дополненное. — М.: АНО «Метеоагентство Росгидромета». С. 51—53.

Тропопауза и максимальный ветер над Казахстаном. (1975). — Алма-Ата: Главное управление гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Управление гидрометеорологической службы КазССР. 204 с.

*Чередниченко В. С.* (1976). Максимальный ветер и ветер на полярной тропопаузе над территорией Казахстана. // Труды КазНИП/И. Вып. 57. С. 19—23.

*Чередниченко В. С.* (1992). Пути повышения эффективности метеорологического обеспечения полетов авиации (на примере Казахстана). // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук, специальность: 11.00.09. — М.: МГУ. 31 с.



## **СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Н. К. Барашкова, М. А. Волкова, И. В. Кужевская*

Томский государственный университет  
634050 Томск, пр. Ленина, 36  
meteo@ggf.tsu.ru

Поступила в редакцию 12.01.2015  
Поступила после доработки 9.02.2015

### **Введение**

Регион Томской области находится в центральной части континента Евразии и его климатические изменения в контексте глобальных изменений по мнению ряда исследователей не столь очевидны. В то же время возникновение опасных и экстремальных погодных условий, несомненно, участилось (Барашкова, 2011), что может отразиться и на климатических характеристиках, используемых для научных и прикладных целей. В связи с этим актуальным является уточнение количественных показателей режима атмосферных осадков. Типичным набором показателей, приводимых в существующих климатических справочниках, являются среднегодовые месячные и годовые суммы осадков, их экстремумы и показатели изменчивости, число дней с осадками разного количества, продолжительность осадков, фазовое состояние и, реже, интенсивность. Ряд специализированных климатических характеристик, например, суточные максимумы сумм осадков различной обеспеченности, востребованы при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, а также в транспортной отрасли (Руководство..., 2008).

С появлением доступных для исследовательских целей массивов суточных данных по атмосферным осадкам (ВНИИГМИ-МЦД, meteo.ru) появилась возможность уточнения для территории Томской области, как перечисленных выше стандартных, так и специализированных климатических характеристик осадков.

### **Материалы и методы исследования**

Информационной базой оценки изменчивости метеорологических (по данным наблюдений) и расчетных параметров атмосферных осадков, характеризующих современные климатические условия на территории Томской области, послужили данные суточного разрешения об атмосферных осадках на 10 метеорологических станциях области за период с 1936 по 2010 гг. (ВНИИГМИ-МЦД, meteo.ru).

Оценка режима атмосферных осадков проводилась для различных временных интервалов: за указанный период в целом, по 30-летиям, за период времени, использованный в действующих Строительных нормах и правилах (СП 131.13330.2012, 2012).

В результате были рассчитаны следующие климатические характеристики:

- среднее многолетнее количество осадков;
- число дней с осадками по градациям ( $\geq 0,1$ ,  $\geq 5,0$  мм);
- периоды непрерывной продолжительности с осадками ( $\geq 0,1$  мм) и без осадков;
- суточный максимум 1 % обеспеченности;
- число дней с опасными явлениями: очень сильный дождь, очень сильный снег, а также с комплексом опасных явлений «сильный дождь», «сильный снег».

Для выявления экстремальных климатических явлений в режиме осадков использованы индексы (STARDEX Diagnostic Extremes Indices), разработанные и рекомендованные ВМО в 1999 г. (STARDEX, 1999):

- R1d — максимальная сумма осадков за сутки;

- R5d — максимальная пентадная сумма осадков;
- SDII — суточный индекс интенсивности осадков;
- R10mm — число суток с осадками  $\geq 10$  мм/сутки;
- R20mm — число суток с осадками  $\geq 20$  мм/сутки;
- CDD — максимальная продолжительность сухих периодов (число дней с осадками  $< 1,0$  мм);
  - CWD — максимальная продолжительность влажных периодов (число дней с осадками  $\geq 1,0$  мм);
  - R95p — сумма сильных осадков.

В расчетах привлекались традиционные статистические методы анализа временных рядов, в том числе тренд-анализ.

### Результаты исследования

Средние многолетние годовые суммы атмосферных осадков изменяются по территории в диапазоне от 453 мм (ст. Первомайское) до 586 мм на станции Ванжиль-Кынак, расположенной на северо-востоке области (табл.1).

Наибольшая изменчивость (коэффициент вариации  $C_v$ ) годовых сумм атмосферных осадков отмечается на станции Бакчар (0,19), минимальная — на ст. Усть-Озерное (0,14), что хорошо согласуется с данными, опубликованными в работе Климат России (2001).

Границы теплого и холодного периодов ориентировочно можно провести с использованием дат перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С. По данным (Климат России, 2001, Барашкова и др., 2009) в Томской области весной — это апрель, осенью — октябрь.

В холодный период (ноябрь — март) количество осадков на территории изменяется от 115 мм (ст. Бакчар) до 177 мм (ст. Томск), в целом, увеличиваясь в направлении с юго-запада на северо-восток территории (рис.1а). Наибольшая изменчивость отмечается также на ст. Бакчар (0,36), наименьшая — ст. Ванжиль-Кынак (0,22).

В теплый период (апрель—октябрь) количество выпавших осадков колеблется (рис.1б) от 336 мм (ст. Первомайское) до 417 мм

Таблица 1

## Средние многолетние характеристики сумм атмосферных осадков

Характеристика	Александровское	Ванжиль-Кынак	Напас	Средний Вастюган	Усть-Озерное	Колпашево	Пудино	Бакчар	Первомайское	Томск	Среднее по области
<i>Год</i>											
Среднее, мм	499,2	586,0	575,4	544,1	527,6	506,1	488,9	468,5	453,3	553,0	520,0
$C_v$	0,17	0,16	0,15	0,16	0,14	0,15	0,16	0,19	0,18	0,16	0,16
Тренд, мм/10 лет	6,7	12,6	15,6	4,9	2,6	15,2	18,2	13,2	12,5	19,5	12,1
<i>Холодный период</i>											
Среднее, мм	118,4	169,1	158,3	144,2	154,6	129,3	118,8	115,2	117,1	177,9	140,3
$C_v$	0,27	0,22	0,28	0,26	0,24	0,31	0,33	0,36	0,30	0,35	0,29
Тренд, мм/10 лет	7	0,6	6,4	3,9	3,9	7	0,3	2,6	2,7	8,7	4,3
<i>Теплый период</i>											
Среднее, мм	380,8	416,9	417,1	399,9	373	376,8	370,1	353,3	336,2	375,1	379,9
$C_v$	0,21	0,19	0,21	0,18	0,19	0,18	0,17	0,23	0,20	0,21	0,20
Тренд, мм/10 лет	-0,3	13	9,2	0,9	-1,3	8,2	8,2	10,7	9,8	10,8	6,9

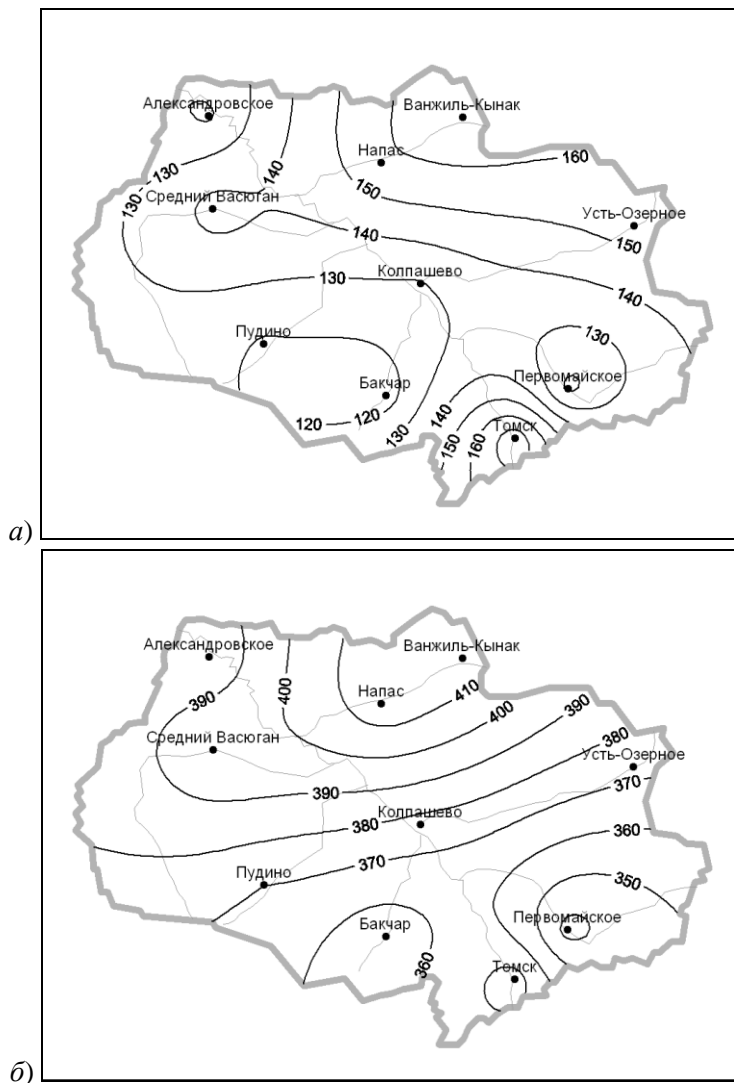


Рис. 1. Распределение средних многолетних сумм атмосферных осадков (мм) за холодный (а) и теплый (б) периоды.

(ст. Напас), а коэффициент вариации изменяется от 0,17 мм (ст. Пудино) до 0,23 (ст. Бакчар). Таким образом, наиболее неустойчивый режим осадков наблюдается в холодный период года на юге исследуемой территории.

Максимальное количество атмосферных осадков приходится на июль и август, что связано с повышенной в эти месяцы повторяемостью циклонических образований (Волкова и др., 2006, Волкова и др., 2009), активностью процессов внутримассовой конвекции и, соответственно, выпадения интенсивных ливневых осадков. Минимум осадков формируется в конце холодного периода (февраль—март), когда территория находится, преимущественно, под влиянием антициклональной циркуляции Сибирского максимума.

Средняя скорость локальных изменений атмосферных осадков (мм/10 лет) в течение последних 50 лет оценивалась с помощью тренд-анализа, который выявил тенденцию повсеместного роста годового количества атмосферных осадков от 2,6 мм/10 лет (ст. Усть-Озерное) до 19,5 мм/10 лет (ст. Томск).

Осредненные по территории месячные суммы осадков имеют тенденцию роста во все месяцы года, кроме августа (рис. 2).

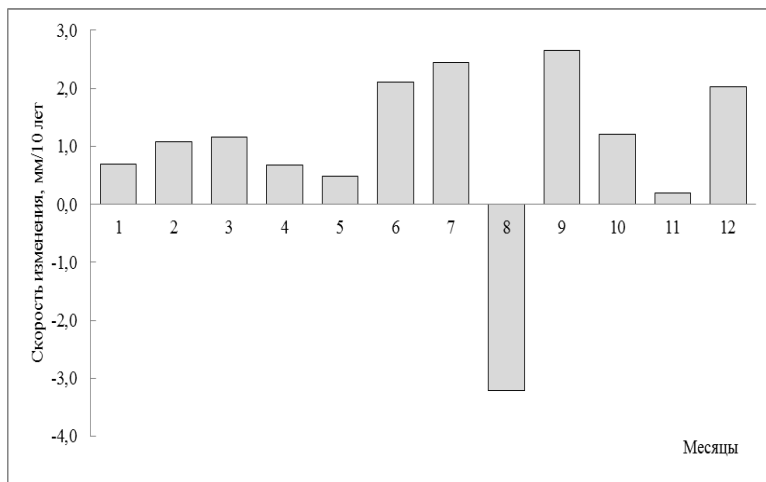


Рис. 2. Скорость изменения среднемноголетних месячных сумм осадков.

Отметим, что на отдельных станциях противоположная тенденция (уменьшения) сумм осадков наблюдается практически в каждом месяце, кроме сентября и декабря. Максимальное же количество станций с отрицательными тенденциями зафиксировано в августе, что отразилось и на осредненной по территории тенденции для этого месяца.

Анализ рассчитанных значений годового числа дней с осадками  $\geq 0,1$  мм и  $\geq 5$  мм, скорости изменения числа дней с осадками за периоды 1961—2010 и 1976—2010 гг. (1976 год — условное начало современного потепления (Груза, 2012)), а также стандартных отклонений (за период 1961—2010 гг.) показал, что их значение по выделенным периодам практически не отличаются, но тенденции существенно различаются (табл.2).

В теплый период число дней с осадками варьирует от 75 до 83, в холодный — от 90 до 110 дней. В то же время, число дней с осадками  $\geq 5,0$  мм в теплый период в 2—3 раза больше, чем в холодный.

Оценка тенденций числа дней с осадками за периоды 1961—2010 и 1976—2010 гг. и за теплый и холодный периоды существенных отличий между ними не выявила. Отсутствие согласованности трендов по территории свидетельствует о наличии скрытых периодичностей в рассматриваемых рядах. Число дней с осадками  $\geq 5,0$  мм имеет более выраженную тенденцию в сторону увеличения: до 1 дня /10 лет. Исключением является станция Усть-Озерное, где эта характеристика в холодный период уменьшается со скоростью  $-0,5 \div -1,0$  день/10 лет.

Характеристики непрерывной продолжительности периодов с осадками/без осадков за год, теплый и холодный периоды года по станциям Томской области представлены в табл.3.

Отметим, что продолжительность осадков, как правило, выражают числом дней (суток) независимо от режима выпадения внутри суток. Определение периода с осадками осуществлялось по А. Н. Лебедеву (Лебедев, 1964), т. е. за период с осадками принималась непрерывная продолжительность дней, в течение которых выпадали осадки в 1, 2, 3, и более сутках.

Таблица 2

## Показатели годового количества дней с осадками более 0,1 мм и более 5,0 мм

Станция	Число дней с осадками $\geq 0,1$ мм, дни					Число дней с осадками $\geq 5$ мм, дни				
	Среднее		$\sigma$	Тренд, дни/10 лет		Среднее		$\sigma$	Тренд, дни/10 лет	
	1961— 2010	1976— 2010		1961— 2010	1976— 2010	1961— 2010	1976— 2010		1961— 2010	1976— 2010
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Теплый период</i>										
Александровское	81	99	9,9	-1,3	0,5	21	24	6	0,3	0,3
Бакчар	75	91	8,3	-1,0	0,1	19	22	5	0,5	0,9
Ван.-Кынак	83	101	11,5	-1,9	-0,3	23	27	5,1	0,8	1,9
Колпашево	77	94	9,7	-1,5	-0,1	21	24	5,0	0,4	1,2
Напас	82	101	8,1	0,8	1,8	22	26	5,3	0,1	1,2
Первомайское	76	94	10,2	0	0,4	19	22	4,9	1,1	0,1
Пудино	75	89	10,4	0,4	4,2	21	24	4,2	0,6	1,3
Ср.Васюган	82	99	10,5	0,3	1,8	22	25	4,9	0,4	1,1
Томск	78	92	10,6	-2,0	1,3	21	25	4,5	0,7	1,2
Усть-Озерное	79	98	13,8	-2,2	-3,3	21	24	6,0	-0,5	-1,0



Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Холодный период</i>										
Александровское	103	86	10,6	1,3	0,7	6	4	3	0,5	1,0
Бакчар	95	79	12,2	1,1	2,3	7	3	8	0,1	0,7
Ван.-Кынак	110	88	12,5	-2,0	-3,0	10	6	3,8	0,0	0,9
Колпашево	100	83	11,1	0,7	2,0	7	4	3,0	0,6	1,5
Напас	108	91	12,7	1,7	1,5	9	6	3,6	0,4	0,9
Первомайское	98	79	11,2	-1,7	-0,4	6	4	2,8	0,2	0,8
Пудино	90	75	13,4	0,8	2,6	6	4	3,4	0,7	0,6
Ср. Васюган	105	85	11,3	-0,3	-1,8	8	5	3,9	0,1	0,5
Томск	103	84	11,4	-0,6	1,8	12	9	4,0	0,8	1,4
Усть-Озерное	109	91	12,1	-1,2	-4,8	8	4	3,6	0,0	1,0

Таблица 3

## Непрерывная продолжительность периодов с осадками и без осадков

Станция	Продолжительность периода, дни								
	без осадков			с осадками $\geq 0.1$ мм			с осадками $\geq 5$ мм		
	ТП	ХП	год	ТП	ХП	год	ТП	ХП	год
Александровское	2,9 (22)	2,5 (22)	2,8 (24)	2,6 (20)	3,2 (22)	2,8 (22)	1,3 (5)	1,1 (2)	1,2 (5)
Бакчар	3,2 (24)	2,8 (24)	3,0 (26)	2,4 (21)	3,1 (16)	2,7 (21)	1,2 (4)	1,1 (2)	1,2 (4)
Ванжиль-Кынак	2,9 (27)	2,6 (28)	2,8 (28)	2,7 (19)	3,7 (27)	3,1 (27)	1,3 (6)	1,1 (3)	1,2 (6)
Колпашево	3,1 (28)	2,6 (26)	2,9 (28)	2,5 (24)	3,2 (28)	2,8 (28)	1,2 (5)	1,1 (3)	1,2 (5)
Напас	2,9 (20)	2,5 (24)	2,8 (24)	2,6 (16)	3,6 (29)	3,0 (29)	1,3 (5)	1,1 (4)	1,2 (5)
Первомайское	3,0 (31)	2,8 (23)	2,9 (31)	2,4 (18)	3,2 (24)	2,7 (24)	1,2 (4)	1,1 (4)	1,2 (4)
Пудино	3,2 (26)	3,0 (25)	3,1 (34)	2,4 (17)	2,9 (16)	2,6 (20)	1,2 (5)	1,1 (3)	1,2 (5)
Средний Васюган	3,0 (20)	2,6 (23)	2,8 (23)	2,6 (16)	3,5 (24)	3,0 (28)	1,2 (5)	1,1 (6)	1,2 (6)
Томск	3,1 (21)	2,6 (26)	2,9 (26)	2,5 (18)	3,4 (28)	2,9 (28)	1,2 (6)	1,2 (4)	1,2 (6)
Усть-Озерное	3,0 (24)	2,6 (18)	2,9 (24)	2,6 (18)	3,9 (28)	3,1 (28)	1,2 (6)	1,1 (3)	1,2 (6)

Примечание.

Средняя продолжительность периода — левый столбец,

максимальная продолжительность периода — правый столбец (в скобках).

ТП — теплый период, ХП — холодный период.

Периоды с осадками выделялись отдельно в холодный (с ноября по март) и теплый периоды (с апреля по октябрь), и в целом за год, как рекомендовано в (Научно-прикладной справочник..., 1993). Непрерывная *максимальная* продолжительность периодов с осадками ( $\geq 0,1$  мм) и без осадков за год и холодный период отличается несущественно, и составляет по территории от 16 до 34 дней. Исключением являются станции Бакчар, Первомайское и Пудино, на которых продолжительность периодов без осадков существенно выше, чем периодов с осадками. В теплое время года непрерывная продолжительность (максимальная и средняя) периодов без осадков повсеместно на территории выше (на 10—30 %), чем периодов с осадками.

Непрерывная *средняя* продолжительность периодов с осадками  $\geq 5$  мм составляет 1,1—1,3 дня с максимальной продолжительностью до 6 дней. В теплый период непрерывная продолжительность выше, чем в холодный.

Анализ количества и продолжительности периодов с осадками и без осадков в холодном и теплом периодах года показал, что наибольшее их количество приходится на однодневные. С увеличением продолжительности их количество уменьшается по степенному закону, при этом радиус временной корреляции составляет 2 дня.

Периодов малой продолжительности (до 3 суток) с осадками больше, чем без них той же продолжительности. С длительности, равной четырем суткам, повторяемость выравнивается, после увеличения продолжительности до 10—11 суток — картина обратная.

Для расчета вероятностей смен состояний в режиме атмосферных осадков последовательность дней с осадками и без осадков приводилась к бинарному состоянию. Ситуация, когда за сутки выпало осадков более заданной суточной ( $\geq 0,1$  мм) суммы, принималась за случай с осадками и обозначалась «1», все остальные ситуации отнесены к состоянию «без осадков», и обозначены «0». Таким образом, образовалась последовательность из «1» и «0». Для оценки вероятности смен состояний в режиме атмосферных осадков

применялись одношаговые вероятности перехода, независящие от времени:

- сохранения дня с осадками,
- смены дня с осадками днем без осадков,
- смены дня без осадков днем с осадками,
- сохранения дня без осадков на следующие сутки.

Оказалось, что вероятность сохранения *дня с осадками* в холодный период выше, чем в теплый и составляет 65,1—74,2 %. В теплый период, наоборот, выше значения вероятности сохранения *дня без осадков* на следующие сутки 65,6—69,3 % (табл.4).

В качестве прикладных климатических характеристик рассчитаны значения максимального за год суточного количества осадков 1% обеспеченности и абсолютного максимума суточного количества осадков, востребованных, например, при сооружении объектов ливневой канализации (табл. 5). Расчет суточного количества осадков 1%-ной обеспеченности проведен с использованием распределения Гумбеля.

Были рассмотрены случаи с выпадением атмосферных осадков, которые входят в перечень опасных природных явлений на территории Томской области, введенный в действие 01.01.2009 г. В табл. 6 приводится повторяемость таких ситуаций, начиная с 1960 г.

Большинство из ОЯ «Очень сильный дождь» было связано с циклоническим типом барического поля, 75 % — теплый фронт, 25 % — холодный фронт.

#### *Индексы экстремальности (STARDEX Diagnostic Extremes Indices)*

Для унификации расчетов по оценки экстремальности погодных условий при исследовании климата в 1999 г. группой исследователей в рамках Исследовательского проекта, поддерживаемого Европейской комиссией в рамках Пятой Рамочной программы ("Глобальное изменение, климат и биоразнообразие" в экологии, энергетике и устойчивого развития), были разработаны индексы. Значения индексов экстремальности, т. е. показателей «экстремальной погоды» существенно различаются для разных регионов Земного шара (Chang, 2014; Iskander, 2014; Vincent et al. 2011).

Таблица 4

Вероятностные характеристики (%) периодов с осадками ( $\geq 0,1$  мм) и без осадков

Станция	Ноябрь—март					Апрель—октябрь				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Александровское	68,9	31,1	38,6	61,4	55,9	60,9	39,1	34,4	65,6	47,1
Бакчар	67,8	32,2	35,3	64,7	52,8	59,4	40,6	31,4	68,6	43,9
Ванжиль-Кынак	73,3	26,7	38,4	61,6	59,5	63,7	36,3	34,3	65,7	48,9
Колпашево	68,7	31,3	37,1	62,9	54,8	59,5	40,5	32,4	67,6	44,7
Напас	72,9	27,1	39,6	60,4	59,9	63,2	36,8	33,9	66,1	48,3
Первомайское	69,1	30,9	35,4	64,6	54,0	58,4	41,6	32,8	67,2	44,3
Пудино	65,1	34,9	33,3	66,7	49,3	57,5	42,5	30,7	69,3	42,2
Средний Васюган	71,2	28,8	38,1	61,9	57,5	61,4	38,6	33,5	66,5	46,7
Томск	70,9	29,1	37,3	62,7	56,7	59,9	40,1	31,8	68,2	44,5
Усть-Озерное	74,2	25,8	37,3	62,7	59,8	62,1	37,9	33,2	66,8	47,0

*Примечание.*

В таблице колонка 1 — вероятность сохранения дня с осадками, 2 — вероятность смены дня с осадками днем без осадков, 3 — вероятность смены дня без осадков днем с осадками, 4 — вероятность сохранения дня без осадков, 5 — фактическая вероятность наступления дня с осадками.

Таблица 5

## Характеристики суточного количества атмосферных осадков

Характеристика	Александровское	Бакчар	Ванжиль-Кынак	Колпашево	Нагас	Первомайское	Пудино	Средний Васюган	Томск	Усть-Озерное
Суточное количество осадков 1% -ной обеспеченности, мм	78,6	107,2	75,9	75,0	85,5	70,0	85,2	59,5	85,8	85,6
Максимальное суточное количество осадков, мм	69,1	101,8	70,7	60,4	78,6	69,2	84,4	56,1	80,5	86,0
Дата	23.08. 2000	06.04. 1975	22.08. 1977	22.08. 2004	13.06. 1996	04.08. 1962	30.07. 1972	18.05. 1983	15.08. 1994	23.09. 1967

Таблица 6

**Число дней с опасными явлениями**

ОЯ	Критерий	Александровское	Ванжилы-Кынак	Напас	Средний Васюган	Усть-Озерное	Колпашево	Пудино	Бакчар	Первомайское	Томск
Очень сильный дождь (жидкие и смешанные осадки)	$\geq 50$ мм/12 ч	3	1	4	-	-	2	4	3	-	4
Очень сильный снег	$\geq 20$ мм/12 ч	2	-	1	2	-	-	-	2	-	2
<i>Явления, в сочетании с другими образующие ОЯ</i>											
Сильный дождь	$\geq 35$ мм/12 ч	8	9	16	8	6	7	15	13	7	11
Сильный снег	$\geq 14$ мм/12 ч	10	2	6	11	2	7	4	11	2	8

Таблица 7

## Индексы экстремальности режима осадков по территории Томской области

Индекс	Единица измерения	Александровское	Усть-Озерное	Ванжиль-Кынак	Напас	Средний Васюган	Колпашево	Пудино	Бакчар	Первомайское	Томск	Область
<i>Среднее значение индекса (1936-2010/1976-2010)</i>												
R1d	мм	31,4	31,0	29,9	33,6	30,4	29,8	32,8	31,3	28,4	31,3	31,0
		30,8	30,5	29,8	37,7	31,8	30,7	32,5	33,7	27,3	32,6	31,7
R5d	мм	54,5	49,7	54,3	55,2	52,2	52,0	52,1	48,9	46,0	49,7	51,5
		52,4	49,2	55,6	57,4	50,2	55,2	50,6	52,0	42,2	51,8	51,6
SDII	мм/сут	4,8	4,4	4,7	4,7	4,8	4,8	4,9	4,7	4,6	4,8	4,7
		4,7	4,3	4,7	4,7	4,7	4,7	4,8	4,7	4,5	4,8	4,7
R10mm	дни	10	9	11,0	10	10	10	9	8,5	8	10	9,5
		9,7	8,9	11,2	10,5	10,2	9,9	9,7	8,8	7,9	10,1	9,7
R20mm	дни	2	2	2,4	2	2	2	2	1,9	2	2	2,1
		2,0	1,8	2,5	2,3	2,3	2,3	2,3	2,0	1,7	1,9	2,1
CWD	дни	6	7	7,6	7	7	6	6	5,8	6	7	6,5
		6,1	7,2	7,3	7,1	6,4	6,3	5,8	5,8	5,9	6,8	6,5



CDD	дни	25	22	20,4	22	23	25	27	24,8	24	23	23,6
		21,8	21,0	21,3	21,6	22,7	22,8	25,1	24,5	23,1	20,1	22,4
R95p	мм	168,2	149,3	176,8	168,2	163,3	157,7	148,7	148,2	144,8	157,9	158,3
		167,9	145,3	179,0	177,5	160,3	167,9	155,7	157,6	147,2	166,0	162,4
<i>Значение линейного тренда (1936-2010/1976-2010)</i>												
R1d	мм/ 10 лет	-0,6	-0,3	0,2	1,2	0,5	0,5	0,0	2,1	-0,7	0,2	0,3
		-1,6	-0,9	1,6	0,2	-2,2	1,2	-0,1	2,4	-0,5	-3,5	-0,3
R5d	мм/ 10 лет	-1,7	-0,8	2,5	0,9	-0,5	1,0	0,5	2,7	-1,7	0,8	0,4
		-3,4	-2,3	4,3	0,1	-3,3	2,8	-3,1	3,6	1,6	-2,1	-0,2
SDII	мм/сут/ 10 лет	-0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		-0,1	-0,1	0,2	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
R10mm	дней/ 10 лет	-0,1	-0,3	0,6	0,2	-0,1	0,2	0,1	0,4	0,1	0,2	0,1
		0,1	-0,7	1,0	1,1	0,2	0,8	0,3	0,7	0,8	1,3	0,6
R20mm	дней/ 10 лет	-0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	-0,1	0,0	0,0
		0,1	-0,4	0,4	0,0	0,1	0,2	-0,1	0,3	0,0	-0,2	0,0
CWD	дней/ 10 лет	0,0	0,1	-0,2	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
		0,1	0,7	-0,3	0,1	-0,2	-0,1	0,2	0,4	0,2	0,7	0,2
CDD	дней/ 10 лет	-0,9	-0,1	0,9	0,2	0,0	-0,4	-0,6	-0,7	-0,2	-0,8	-0,3
		-0,9	1,5	1,1	-0,9	-1,0	2,0	-1,2	-1,1	-0,2	-0,6	-0,1
R95p	мм/ 10 лет	-1,5	-5,1	7,9	4,8	0,5	4,7	4,0	8,9	1,1	3,5	2,9
		1,9	-12,8	16,8	15,5	-0,1	19,6	-0,6	13,6	14,4	13,6	8,2

В Томской области отмечается увеличение частоты проявлений экстремальных условий погоды, в том числе, и по режиму атмосферных осадков (Поляков и др., 2014). В табл. 7 приводятся значения индексов и показателя их линейного тренда для анализируемых периодов по станциям и в целом по территории области.

Максимальное количество осадков в году, выпавших за сутки (**R1d**) по территории изменяется от 27,3 мм до 37,7 мм (период 1976—2010) и от 28,4 до 33,6 мм (1936—2010). Нижний предел относится к ст. Первомайское, верхний — к ст. Напас.

В среднем по территории величина индекса составляет 31 мм ( $\sigma = 12$  мм). Тренд величины, в целом, положительный, в последние 35 лет поменял знак, оставшись по величине прежним (0,3 мм/10 лет). Среднее значение выросло, в основном, за счет станций Напас, Томск и Бакчар (рис. 3).

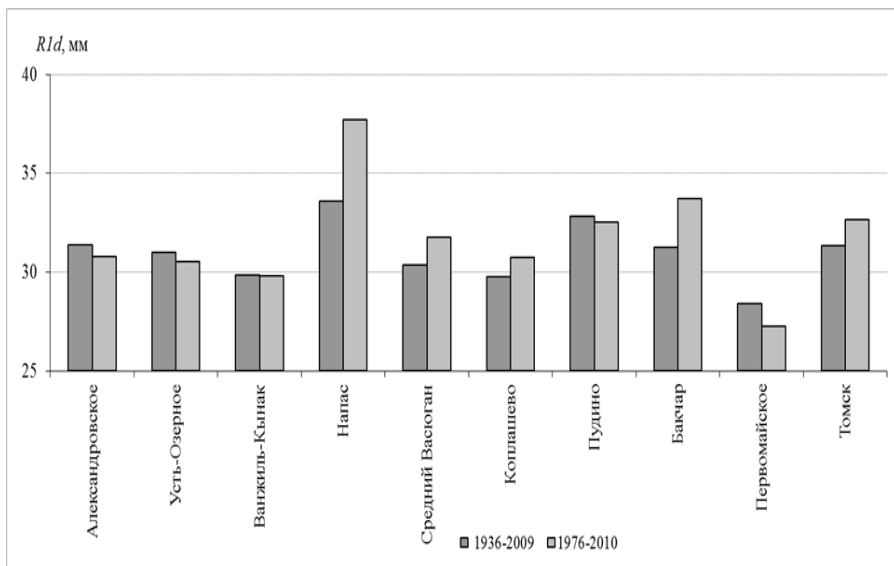


Рис. 3. Индекс **R1d** для станций Томской области.

Максимальная пентадная сумма осадков (**R5d**) равняется 51,5—51,6 мм. Последние 35 лет характеризуются ростом индекса на половине станций, на остальных он уменьшается. Тенденции R5d по каждой станции идентичны таковым по R1d, при этом тренд R5d стал более слабым (+0,4 — за весь период, -0,2 мм/10 лет — за период 1976—2010 гг.).

Индекс **SDII** — отношение годовой суммы осадков к числу дней с осадками  $\geq 1$  мм в сутки — стабильно устойчивая для региона характеристика (4,7 мм/сут.), хотя её межгодовая изменчивость достаточно значительная. Например, на станции Томск величина изменяется от 3,6 мм/сут. (1957) до 5,8 мм/сут. (1941). Тренд слабо отрицательный лишь на двух станциях — Александровское и Усть-Озерное.

Количество дней в году с суточной суммой осадков  $\geq 10$  мм (**R10mm**) значительно возрастает для ст. Томск в период 1976—2010 гг. со скоростью до 1,3 сут./10 лет по сравнению 0,2 сут./10 лет за весь период. Для 5 из оставшихся станций области наблюдается аналогичная картина, для 4 северных станций явной тенденции к увеличению, в последние 35 лет, пока не проявилось (табл. 7).

Для индекса, отражающего число суток с осадками  $\geq 20$  мм (**R20mm**), наблюдается стабильная ситуация без значимого изменения как по станциям, так и по периодам и составляет 2—2,5 дня в году.

Диапазон изменения суммы сильных осадков (**R95p**) за весь период исследования составил от 144,8 мм (Первомайское) до 176,8 мм (Ванжиль-Кынак), при этом за последние 35 лет величина индекса выросла до 145,3 мм (Усть-Озерное) и 179,0 мм (Ванжиль-Кынак) (рис. 4). В среднем для территории R95p составил 158,3 мм за весь период и 162,4 мм в последние 35 лет. Скорость увеличения сильных осадков выросла в 1976—2010 гг. до 8,2 мм/10 лет по отношению к 2,9 мм/10 лет за весь период. Наибольшая скорость роста зафиксирована на ст. Колпашево до 19,6 мм/10 лет. Значимая тенденция к уменьшению отмечена лишь на ст. Усть-Озерное (-12,8 мм/10 лет).

Максимальное число последовательных влажных дней в году с осадками  $\geq 1.0$  мм в сутки (**CWD**) составляет в среднем по территории 6,5 дней ( $\sigma$  1,7 дней). В последние 35 лет эта характеристика имеет положительный тренд 0,2 сут/10 лет. Можно отметить, что индекс соответствует типичной средней продолжительности естественно-синоптического периода, характеризующего однородную направленность синоптических процессов. Величина CWD указывает на то, что периоды выпадения осадков становятся длиннее.

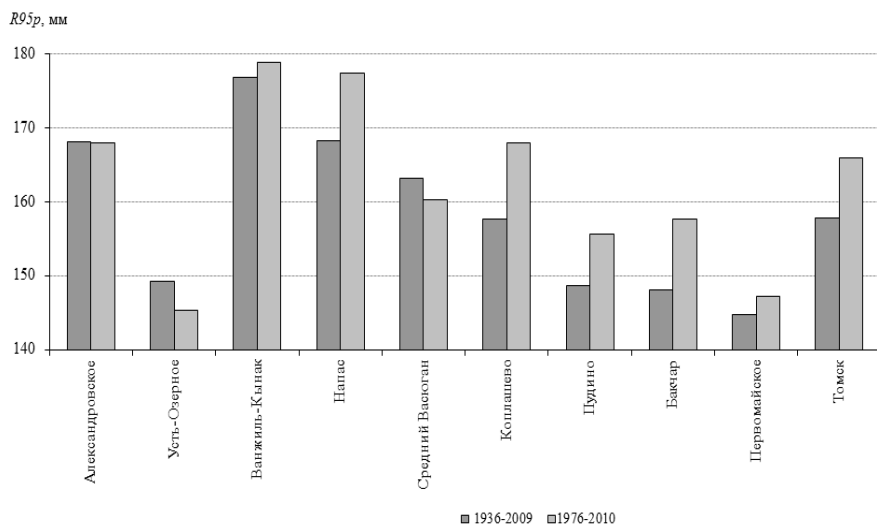


Рис. 4. Индекс **R95p** для станций Томской области.

В табл.8 приводятся наиболее длительные периоды по станциям, например, на ст. Усть-Озерное — 20 дней, на ст. Томск — 18 дней. Видно, что такие длительные периоды встречаются как в теплый (август, сентябрь, октябрь), так и в холодный (ноябрь, декабрь) периоды года.

Максимальная продолжительность сухих периодов (**CDD**) в среднем составляет 20—27 дней, но в отдельные годы превышает 50 дней (табл.8).

Таблица 8

## Абсолютные значения и даты индексов CWD и CDD в период 1936—2012 гг.

Индекс	Александровское	Усть-Озерное	Ванжилы-Кынак	Напас	Средний Васюган	Колпашево	Пудино	Бакчар	Первомайское	Томск
CWD	10	20	17	11	14	12	10	11	10	18
Дата начала	29.5. 2002	2.12. 2006	10.8. 1975	20.9. 1952, 31.10. 1998	23.1. 1959	27.10. 2011	27.7. 1956	23.6. 2007	18.5. 1984	10.10. 1969
N*	6	7	7	6	4	7	5	9	6	8
CDD	84	50	38	54	52	64	64	65	59	57
Дата начала	10.1. 1945	26.1. 1945	24.7. 2003	9.1. 2012	11.2. 1989	12.1. 1945	16.1. 2012	9.1. 2012	29.1. 1943	17.1. 2012
N*	1	5	8	8	5	7	3	6	6	4

Примечание.

N\* – количество лет, входящих в первую десятку рангов общего ряда.

Тенденция к уменьшению есть во всем периоде, но в последнее 35-летие эта тенденция ослабла за счет вклада северных станций (табл.7). Максимальная повторяемость наблюдается преимущественно в период с января по апрель.

### **Заключение**

Для территории Томской области исследованы структура и динамика режима атмосферных осадков: вероятностные показатели, непрерывная продолжительность периодов с осадками и без осадков, тенденции изменения.

Годовое количество атмосферных осадков в течение последних 50 лет имеет тенденцию повсеместного роста от 2,6 мм/10 лет (ст. Усть-Озерное) до 19,5 мм/10 лет (ст. Томск). В рядах годового числа дней с осадками  $\geq 0,1$  и  $\geq 5$  мм отсутствует согласованность их трендов по территории, что может свидетельствовать о наличии скрытых периодичностей в них.

Периоды выпадения осадков на территории становятся длиннее, причём наиболее длительные встречаются с августа по декабрь. Максимальная продолжительность сухих периодов, наиболее часто встречаемых в период с января по апрель, имеет тенденцию к уменьшению, которая в последнее 35-летие несколько ослабла за счет вклада северных территорий. Количество дней в году с суточной суммой осадков  $\geq 10$  мм значительно возрастает для ст. Томск — до 1,3 сут./10 лет (1976—2010) по сравнению 0,2 сут./10 лет за весь период.

Результаты исследования могут быть использованы для оценки современной климатической составляющей хозяйственного комплекса территории, при составлении долгосрочных прогнозов.

*Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (№ 5.628.2014/К).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бараишкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В.* (2011). Оценка современной климатической составляющей хозяйственного комплекса Томской области в холодный период года // Вестник Томского государственного университета, серия «Науки о земле». № 351. С. 163—168.

*Бараишкова Н. К., Кужевская И. В., Носырева О. В.* (2009). Переход температуры воздуха через 0 °С на юге Западной Сибири: режим, статистические характеристики и сопутствующие циркуляционные условия // Вестник Томского государственного университета. Серия «Науки о земле». № 325. С. 191—195.

*Волкова М. А., Катаев С. Г., Кусков А. И., Комаров А. И.* (2006). Циркуляционные условия формирования полей осадков теплого периода года на территории Томской области // Вестник Томского государственного педагогического университета. Серия «Естественные и точные науки». № 6 (57). С. 87—92.

*Волкова М. А., Кусков А. И., Чередыко Н. Н.* (2009). Пространственно-временная структура атмосферных осадков в Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Серия «Науки о земле». №3 28. С. 214—219.

*Груза Г. В., Ранькова Э. Я.* (2012). Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 194 с.

Климат России (2001). / Под ред. Н. В. Кобышевой. – СПб.: Гидрометеиздат. 656 с.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. (1993) .Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. — СПб.: Гидрометеиздат. 718 с.

*Лебедев А. Н.* (1964). Продолжительность дождей. — Л.: Гидрометеиздат. 230 с.

СП 131.13330.2012 (2012). Строительная климатология. — М.: Минрегион России. 120 с.

*Поляков Д. В., Бараишкова Н. К., Кужевская И. В.* (2014). Погодно-климатическая характеристика аномального лета 2012 г. на территории Томской области // Метеорология и гидрология. № 1. С. 38—47.

*Российский гидрометеорологический портал* ВНИИГМИ-МЦД. [Электронный ресурс]. URL: доступа: <http://meteo.ru> (дата обращения: 15.01.2013).

Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами (2008). / Под ред. д-ра геогр. наук, проф. Н.В. Кобышевой. — СПб.: ЦНИТ «Астерион». 336 с.

*Chang M., Dereczynski Cl., Freitas M. A. V. and Chou S. C.* (2014). Climate change index: a proposed methodology for assessing susceptibility to future climatic extremes // American Journal of climate change. Vol. 3. P. 326—337.

*Iskander S. M., Rajib M. A. and Rahman M. M.* (2014). Trending regional precipitation distribution and intensity: use of Climatic Indices // *Atmospheric and Climate Sciences*. 2014. Vol. 4. P. 385—393. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2014.43038>

*Framework Programme: Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions (STARDEX).* (1999). URL доступа: <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>

*Vincent L. A. at al. (Aguilar E., Saindou M., Hassane A. F., Jumaux G., Roy D., Booneedy P., Virasami R., Randriamarolaza L. Y. A., Faniriantsoa F.R., Amelie V., Seeward H., and Montfraix B.* (2011). Observed trends in indices of daily and extreme temperature and precipitation for the countries of the western Indian Ocean, 1961—2008 // *J. Geophys. Res.* Vol. 116, D10108, doi:10.1029/2010JD015303.



**МЕТОДИКА МЕТЕОЗАВИСИМОЙ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ  
ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ПЕРСОНАЛА АЭРОДРОМА  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ**

*Г. И. Мазуров<sup>1</sup>, В. В. Татаринов<sup>2</sup>, О. В. Базарский<sup>2</sup>, А. А. Томилов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова  
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: nanmaz@rambler.ru

<sup>2</sup> ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия  
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 «А»  
E-mail: valery.tatarinoff@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.12.2014

### **Введение**

Аэродромы государственной авиации (АГА) относятся к числу недостаточно изученных локальных природно-технических геосистем, на территории которых происходит техногенное загрязнение атмосферного приземного слоя (АПС) и почвы в результате эксплуатации воздушных судов (ВС) и обслуживающего их автомобильного транспорта (АТ) (Астапенко и др., 1985; Мазуров, Белогуб, 2009; Мазуров, Акселевич, Биденко, 2013; Мазуров, 2009). Изучение воздействия выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) двигателями ВС и АТ, а также с различных объектов аэродромов на загрязнение АПС было впервые начато в США (Цупко, 1993). Они отмечали, что крупные аэродромы, наравне с автотранспортом мегаполисов, являются локальными источниками загрязнения. При этом было показано, что эрозия и загрязнение почвы приаэродромных территорий происходит в результате их затопления загрязненными сточными водами с искусственных покрытий и водонепроницаемых грунтов, а также из-за небрежного хранения и

расходования горюче-смазочных материалов. В результате в таких водах концентрация нефтепродуктов достигает 12 мг/л при норме 0,05 мг/л, то есть превышает ее в 240 раз (Цупко, 1993). На таких зараженных местностях происходит омертвление растительности.

По рекомендациям экологов (Безуглая, 1980; Мазуров, Нестерук, 1992; Родюков, 2005) за пределами аэродрома желательно иметь лесной массив площадью 100—140 км<sup>2</sup>. Он способен каждый год выделять в окружающую среду не менее 70 тыс. т кислорода и нейтрализовать таким образом до 1000 т выброшенных в атмосферу ядовитых газообразных веществ. Кроме того, на каждом аэродроме может быть несколько зараженных участков, на которых необходимо проводить мероприятия по очистке и по восстановлению окружающей среды (Цупко, 1993).

Интенсивное развитие больших городов привело к тому, что большинство аэропортов оказались размещенными на их окраинах, как это наблюдается в городе Воронеже с населением в 1 млн человек. Поэтому геоэкологическое изучение АГА необходимо производить не только как локальной геосистемы, но и при его взаимодействии с городом, расположенным в непосредственной близости.

Концентрация ЗВ в АПС во многом зависит от климатических условий и метеорологических факторов, присущих исследуемому району.

Наибольшее количества ЗВ выбрасывается на аэродроме в процессе подготовки ВС к полету, то есть в районе площадки предварительной и предполетной подготовки (ППП), которая и является объектом исследования.

## **1. Состояние проблем**

К сожалению методы оценки экологического состояния атмосферы в зависимости от метеорологических условий разработаны в основном для городов (Безуглая, 1980; Сонькин, 1991). Аэродромы как локально-техногенные системы гораздо менее исследованы в экологическом плане. Известны индексы эмиссии ЗВ от двигателей ВС, работающих в различных режимах, а также от двигателей автомобилей. Эти данные позволяют оценить только валовые выбросы ЗВ на территорию

аэродромов, но не позволяют оценить пространственное загрязнение атмосферы и почвы на них. Выполненная оценка показывает, что по суммарным выбросам загрязнение городской атмосферы от эксплуатации аэродрома составляет 0,1 % и является незначительным.

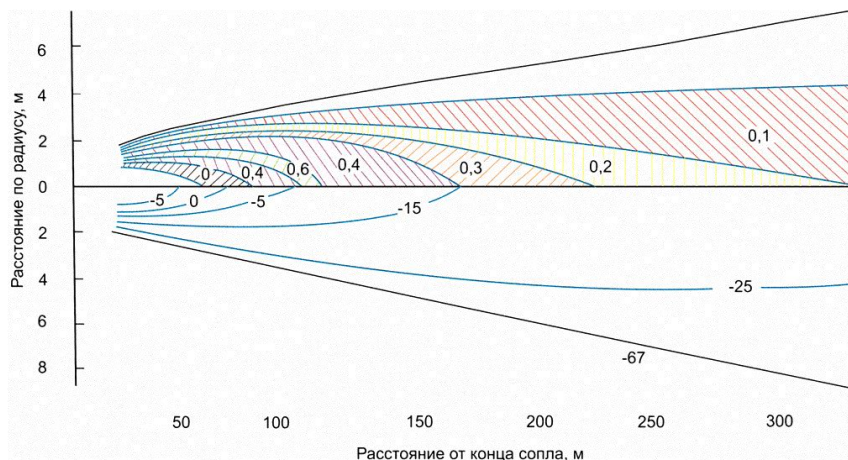


Рис. 1. Структура аэродинамического следа за самолетом Б-47 США зимой (Баранов и др., 1966) зимой.

Распределение абсолютной влажности показано выше оси следа, распределение температуры — ниже оси.

Существующие модели турбулентного рассеяния ЗВ в атмосфере (Безуглая, 1989; Ивлев, Иванов, Жуков, 1991; Сонькин, 1991; Татаринев, 2013) не могут быть использованы для оценки интегрального загрязнения аэродромов по следующим причинам:

- факел отработавших газов (ОГ) самолета является объемным источником пространственно-временного распределения ЗВ при сложном температурном режиме в нем (рис. 1);

- основной источник эмиссии ЗВ на аэродроме — площадка предварительной и предполетной подготовки — не является для служб обслуживания ВС и управления полетами точечным;

- на площадке ППП могут располагаться группировки, содержащие различное количество ВС и средств наземного обслуживания общего применения (СНО ОП);

- загрязнение почв аэродрома тяжелыми металлами и органическими веществами исследовано недостаточно;

- не существует моделей, позволяющих рассчитать интегральное загрязнение окружающей среды при различных метеоусловиях и выявить экологический риск для персонала.

Следовательно, разработка методики оценки геоэкологического состояния окружающей среды на источниках загрязнения аэродромов, позволяющей оценить экологический риск для персонала, работающего в загрязненных зонах, является весьма актуальной задачей.

## **2. Исходный материал и методика исследования**

С учетом выявленной пространственной структуры факелов выбросов ВС (рис. 1) были выбраны стационарные точки отбора проб для стандартной группировки — два действующих ВС и пять СНО ОП на площадке ППП. Размер площадки 40 × 65 м. На ней экспериментально выбрано шесть точек измерения вокруг каждого ВС и обеспечивающими его СНО ОП в зоне их взаимодействия, где турбулентность атмосферы максимально возможная и среднеквадратичные отклонения результатов измерений достаточно большие. ВС стояли перпендикулярно друг к другу вблизи центральной оси площадки ППП. Один проверяет двигатели у газотбойника, а другой готовится к взлету. При увеличении числа самолетов у газотбойников пропорционально увеличивается масса выбросов. Турбулентное рассеяние этих ЗВ происходит в ограниченном объеме технической позиции обслуживания воздушных судов, в то время как на взлетно-посадочной полосе (ВПП) рассеяние идет по всей ее длине от одного ВС, и концентрация ЗВ существенно меньшая.

Остальные 13 точек находились на краю этой площадки, по ее периметру. Одна опорная точка располагалась за пределами площадки

ППП на расстоянии 20 м от нее, где наблюдался пониженный уровень турбулентности, концентрация ЗВ была на уровне ПДК, и отклонения от средних значений были незначительные.

Всего в этих стационарных точках были произведены измерения в теплый и холодный периоды года, из них 420 измерений — при благоприятных метеоусловиях (БМУ), а 336 — при неблагоприятных метеоусловиях (НМУ).

В работах Э. Ю. Безуглой (1980) показано, что основными НМУ, способствующими накоплению ЗВ, являются слабые ветра со скоростями менее 2 м/с и наличие приземных инверсий. БМУ являются скорости ветра, большие 3 м/с и отсутствие инверсий.

В процессе измерений фиксировалась скорость ветра, а также наличие инверсии (по метеорологическим и аэрологическим данным). Измерения различных ЗВ производились газосигнализатором «Комета-М» (Татаринов, Томилов, Молодцов, 2012) три раза в каждой точке в течение летной смены, когда состав группировки на площадке ППП неизменен. Квазистационарное распределение ЗВ устанавливалось в течение 35 минут после начала летной смены. Точность измерений по СО равна 1 мг/м<sup>3</sup>, по NO<sub>2</sub> — 0,01 мг/м<sup>3</sup>.

### **3. Основные результаты и их анализ**

Результаты статистической обработки измерений концентраций ЗВ на площадке ППП в холодный и теплый периоды года при НМУ и БМУ приведены в таблице 1.

Сравнение коэффициентов концентраций показывает, что загрязнение диоксидом азота более чем в два раза больше, чем оксидом углерода. Этот факт объясняется высокой температурой отработавших газов двигателей ВС, и более высоким уровнем дожигания оксида углерода, чем у автомобилей. В теплый период концентрация ЗВ возрастает вследствие большей интенсивности полетов в течение летной смены.

Почвы аэродрома являются депонирующей средой, накапливающей через атмосферу загрязнения в виде аэрозолей тяжелых металлов, а также нефтепродуктов. Отбор проб почвы

производился по методу конверта в четырех точках по периметру площадки ППП на расстояниях 20 м от ее края. Осредненные результаты анализа, проведенного в аккредитованной лаборатории, приведены в таблице 2.

Таблица 1

**Средние значения (мг/м<sup>3</sup>), среднеквадратические отклонения и коэффициенты концентрации ЗВ на площадке ПП**

Загрязняющие вещества		Оксид углерода (СО)			Диоксид азота (NO <sub>2</sub> )		
Период	Результат	С <sub>ср</sub>	СКО	К <sub>к</sub>	С <sub>ср</sub>	СКО	К <sub>к</sub>
	МУ						
Холодный	БМУ	15	4,8	5	0,48	0,036	12
	НМУ	18	6,9	6	0,56	0,044	14
Теплый	БМУ	17	7,9	5,7	0,52	0,043	13
	НМУ	22	8,6	7,3	0,59	0,047	15

Примечание.

В таблице приняты обозначения: средняя концентрация по площадке ППП — С<sub>ср</sub>; среднеквадратическое отклонение — СКО; коэффициент концентрации ЗВ по площадке ППП — К<sub>к</sub> = С<sub>ср</sub>/ПДК<sub>сс</sub>, где среднесуточная ПДК<sub>сс</sub> = 3 мг/м<sup>3</sup> для СО и 0,04 мг/м<sup>3</sup> для NO<sub>2</sub>.

Таблица 2

**Значения концентраций основных элементов-загрязнителей в почве, (мг/кг), превышающих региональный фон**

Элемент	ПДК, ОДК	Фактическое содержание	Региональный фон
Кадмий (Cd)	2,0	0,37 ± 0,08	0,32
Ртуть (Hg)	2,1	0,025 ± 0,008	0,009
Свинец (Pb)	32	29,5 ± 6,2	24,8
Цинк (Zn)	220	170 ± 35,7	51,4
Нефтепродукты	—	1019 ± 225	196

#### 4. Методика метеозависимой оценки геоэкологического состояния окружающей среды на АГА

На первом этапе по В.Т. Трофимову (2000) вычисляется интегральный показатель загрязнения окружающей среды по формуле:

$$I_c = \sum_{i=1}^n K_i - (n - 1), \quad (1)$$

где  $K_i = C_i / ПДК_i$  — коэффициент концентрации  $i$ -го ЗВ;  $n$  — число ЗВ как в атмосфере, так и в почве вблизи площадки ППП.

Учет этих двух геосфер в одной формуле основан на высоком уровне турбулентности на площадке ППП и на расстояниях 20 м от нее в следствии непрерывной работы реактивных двигателей ВС в течение летной смены, и подъема частиц ЗВ выпавших на почву. Согласно Э. Ю. Безуглой (19800, ЗВ имеющие  $K_k < 1$  не учитываются, то есть почвенное загрязнение учитывалось только по нефтепродуктам, условно-допустимая концентрация которых принята за техногенный региональный фон по Центрально-черноземному району.

С учетом годового времени работы персонала в загрязненной зоне  $t$ , экологическая опасность может быть определена следующим образом

$$I_{c,t} = I_c \cdot t / T, \quad (2)$$

где  $T$  — общегодовое время.

Расчетные уровни экологической опасности для персонала исследуемого аэродрома приведены в таблице 3.

Таблица 3

**Уровни экологической опасности  $I_{c,t}$  для персонала, работающего на площадке ППП**

Холодный период		Теплый период	
БМУ	НМУ	БМУ	НМУ
4,9	5,8	5,2	6,4

На втором этапе оценивается экологический риск для персонала АГА. Он определяется выражением

$$R = P \cdot Q, \quad (3)$$

где  $P$  — вероятность реализации неблагоприятного события,  $Q$  — возможный ущерб. Вероятность неблагоприятного события, НМУ, определяется отношением

$$P = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{N}, \quad (4)$$

где  $N_1$  — количество дней в году, когда наблюдается штиль или скорость ветра менее 2 м/с;

$N_2$  — количество дней в году, когда наблюдается приземная инверсия;

$N_3$  — количество дней в году, когда наблюдается сочетание штиля и инверсии;

$N$  — количество дней в году.

Таблица 4

**Экологическая опасность различных уровней загрязнения окружающей среды**

Число дополнительных смертей в год на 10000 населения	Ущерб $Q$	Уровень приемлемости ущерба	Индекс экологической опасности $I_{c,\tau}$	Классификация уровня экологической опасности
$10^{-2}$	$10^{-6}$	Приемлем без ограничений	$0 < I_{c,\tau} \leq 1$	Экологическая норма
$10^{-1}$	$10^{-5}$	Ущерб принимается добровольно	$1 < I_{c,\tau} \leq 5$	Экологический риск
1	$10^{-4}$	Приемлем при выполнении служебных обязанностей	$5 < I_{c,\tau} \leq 6$	Экологическая опасность
3	$3 \cdot 10^{-4}$	Приемлем в чрезвычайных обстоятельствах	$6 < I_{c,\tau} \leq 10$	Экологический кризис
10	$10^{-3}$	Ущерб неприемлем	$I_{c,\tau} > 10$	Экологическое бедствие



Ущерб  $Q$  определяется возможным количеством экологически обусловленных смертей в течение года в расчете на десять тысяч населения-персонала АГА.

Величины ущерба по шкале Эшби, определяющей количество смертей на миллион человек и его связь со шкалой индекса экологической опасности Трофимова — Косиновой (Татаринов, 2013; Трофимов, 200) приведены в таблице 4.

В целом можно оценить среднегодовой риск работы персонала на аэродроме в зоне загрязнения при БМУ и НМУ. По климатическим данным за 2008—2013 годы на аэродроме «Воронеж-Б» вероятность НМУ  $P = 0,38$ . Вероятность БМУ  $P = 0,62$ .

Ранжирование метеозависимого экологического риска для АГА приведено в таблице 5 (Татаринов, Томилов, Минакова, 2013).

Таблица 5

**Ранжирование уровня экологических рисков для АГА**

Уровень риска $R$	Классификация экологического риска
$0 < R \leq 5 \cdot 10^{-7}$	Риск приемлем без ограничений
$5 \cdot 10^{-7} < R \leq 7 \cdot 10^{-6}$	Добровольный риск человека
$7 \cdot 10^{-6} < R \leq 7 \cdot 10^{-5}$	Приемлемый риск в рамках служебных обязанностей
$7 \cdot 10^{-5} < R \leq 1,5 \cdot 10^{-4}$	Риск приемлем в чрезвычайной ситуации
$R > 1,5 \cdot 10^{-4}$	Риск неприемлем

При БМУ в холодный период наблюдается экологический риск и ущерб оценивается как добровольный. При НМУ в холодный период и БМУ – в теплый наблюдается приемлемый служебный ущерб, которому соответствует служебный риск. Наиболее опасными являются НМУ в теплый период, соответствующие приемлемому ущербу в чрезвычайной ситуации. От чрезвычайного риска можно уйти, переведя его в служебный, при выполнении служебных регламентных мероприятий:

- использование качественного топлива, четкого регулирования процессов горения в двигателях ВС и СНО ОП, выдерживания и

сокращения регламентов времени выхода на различные режимы работы двигателей ВС при наземных операциях;

- буксировка ВС с площадки ППП тягачем до стартовой площадки;

- снижение количества ЗВ на площадке ППП возможно путем уменьшения автомобилей-топливозаправщиков за счет использования систем централизованной заправки топливом и автомобилей на базе Урал, за счет использования стационарных электрических систем для запуска ВС;

- с целью снижения негативного воздействия продуктов сгорания на окружающую среду и людей на площадке ППП, в местах прогазовки ВС необходимо устанавливать усовершенствованные модели газоотбойных щитов, которые обеспечивали бы отбой струи отработанных газов на всю ее ширину и высоту и дополнительно оборудованы ветряками для забора ОГ с целью зарядки стационарных электрических систем для запуска ВС;

- необходимо перенести стоянку средств АТО из района, расположенного около 60 м за газоотбойниками на другую сторону ППП;

- за газоотбойниками построить систему гидроосаждения аэрозольных частиц, в которую входит фонтан струйный с высотой струй до 3—4 м;

- рекомендуется использование герметизирующей кабины АТ и отбор очищенного воздуха в кабину воздушного судна;

- планирование интенсивности полетов предлагается проводить с учетом не менее 2-часовой разницы между моментами окончания подготовки бетонного покрытия тепловыми и поливомоечными машинами и подачей СНО ОП, ВС и обслуживающего персонала на площадку ППП;

- в целях снижения негативного воздействия на окружающую среду и обслуживающий персонал, работающий на площадке ППП, рекомендуется высадка на прилегающей к ней территории защитных полос зеленых насаждений из пород мелкого и среднего кустарника, устойчивых к выхлопным газам, а также водное осаждение аэрозольных частиц;

- для совершенствования системы мониторинга и контроля в зоне действия объектов аэродрома на основании результатов моделирования уровня загрязнения на отдельной площадке предлагается установка следующих передвижных постов наблюдения: на удалении 20 м от края площадки; в помещениях, где во время полетов находится летно-технический состав.

Целью предлагаемых природоохранных мероприятий совместно с задачами мониторинга является оценка экологической ситуации и принятие решения на производство тех или иных видов работ с целью сохранения здоровья людей (Торгунаков, Мазуров, Акселевич, 20120).

Помимо организационно-технических мероприятий предлагается инженерное решение по подготовке топлива ВС и СНО ОП, снижающее экологическую нагрузку на окружающую среду. Предлагается устройство для предварительной подготовки топливной смеси для ВС и СНО ОП, которое позволяет (Решение..., 2013):

- снижать выбросы оксида углерода в отработавших газах от 10 % до 30 %, а выбросы углеводородных остатков до концентрации ниже ПДК;

- экономить топливо в пределах до 15 %.

Предлагаемый активатор имеет три последовательно расположенные ступени воздействия на топливную среду, приводящих к самоорганизации энергетического состояния топлива по принципу увеличения масс-долей легких и средней тяжести углеводородов (коротких и средних молекулярных цепей топлива).

Активатор не требует какого-либо привода, не содержит химических веществ и не приводит к изменению показателей топлива, регламентируемых соответствующими ГОСТ (октанового и цетанового чисел, фракционного состава), от которых зависит заводской ресурс двигателя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астапенко П. Д., Баранов А. М., Шварев И. М.* (1985). *Авиационная метеорология*. — М.: Транспорт. 202 с.
- Баранов А. М., Мазурин Н. И., Солонин С. В., Янковский И. А.* (1966). *Авиационная метеорология*. — Л.: Гидрометеоиздат. 287 с.
- Безуглая Э. Ю.* (1980). *Метеорологические и климатические особенности загрязнения воздуха городов*. — Л.: Гидрометеоиздат. 184 с.
- Ивлев Л. С., Иванов В. А., Жуков В. М.* (1991). *Эволюция морфологической структуры стратосферных аэрозолей // Труды ГГО. Вып. 534. С. 146—153.*
- Мазуров Г. И., Белозуб В. П.* (2009). *Антропогенные облачные образования: условия возникновения и возможности регулирования их развития. // «Метеоспектр». № 1. С. 81—90.*
- Мазуров Г. И., Нестерук В. Н.* (1992). *Метеорологические условия и полеты вертолетов*. — СПб.: Гидрометеоиздат. 256 с.
- Мазуров Г. И., Акселевич В. И., Биденко С. И.* (2013). *Облачные мезонеоднородности и возможности управления их эволюцией в целях создания локальных благоприятных условий погоды*. — СПб.: «Технолит». 190 с.
- Мазуров Г. И.* (2009). *Основные результаты численных, лабораторных и натурных экспериментов по созданию искусственных облачных образований. // «Метеоспектр». №4. С. 55—72.*
- Решение о выдаче патента на изобретение от 05.06.2013 г. по заявке № 2011134397/05(050935) от 16.08.2011 г. «Роторно-пульсационный аппарат» / В. В. Татаринов, А. Е. Ломовских, А. А. Томилов, В. П. Иванов и др.
- Родюков И. С.* (2005). *Геозокологическая оценка приземного слоя атмосферы на территории аэродромного комплекса / Автореф. дисс. канд. геогр. наук. — Воронеж: ВВВАИУ. 26 с.*
- Сонькин Л. Р.* (1991). *Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы*. — Л.: Гидрометеоиздат. 224 с.
- Татаринов В. В., Томилов А. А., Молодцов Э. В.* (2012). *Экспериментальный и диапазонно-параметрический анализ измеряемых соединений газосигнализаторами в атмосферном воздухе аэродрома государственной авиации*. — Москва: «Научное издание». № 1. Т. 13. С. 69—74.
- Татаринов В. В.* (2013). *Оценка загрязнения атмосферы и почвы на аэродроме государственной авиации / В сб.: Актуальные проблемы инновационных систем информатизации и безопасности*. — Воронеж: «Научная книга». С. 125—130.
- Татаринов В. В., Томилов А. А., Минакова Л. М.* (2013). *Экологический риск для персонала и мероприятия по его снижению на аэродроме государственной авиации /*

В сб.: Актуальные проблемы инновационных систем информатизации и безопасности. – Воронеж: «Научная книга». С. 130—133.

*Торгунаков Е. А., Мазуров Г. И., Акселевич В. И.* (2012). Безопасность жизнедеятельности. // – СПб.: «Технолит», 2012. 445 с.

*Трофимов В. Т.* (2000). Теоретико-методологические основы экологической геологии. — СПб.: Изд-во СПбГУ. 176 с.

*Цупко Н.* (1993). Аэродром и экология //Авиация и космонавтика. № 7. С. 10—11.

## **ПРИЗЕМНЫЙ ОЗОН В НОВОСИБИРСКЕ**

*Т. С. Селегей, Н. Н. Филоненко, Т. Н. Ленковская*

Сибирский региональный научно-исследовательский  
гидрометеорологический институт  
630090 Новосибирск, ул. Советская, 30  
E-mail: selegey@sibnigmi.ru

Поступила в редакцию 12.04.2014  
Поступила после доработки 1.12.2014

### **Введение**

Новосибирск — промышленный и областной центр Западной Сибири с населением около 1,5 млн человек.

Контроль за качеством городского воздуха по содержанию в нем приземного озона осуществляется с 2003 года в рамках реализации решений Межведомственной комиссии Совета Безопасности РФ по экологической безопасности от 25.10.2001 г. «О мерах по снижению негативного влияния техногенного загрязнения окружающей природной среды на состояние здоровья населения».

Озон ( $O_3$ ) — бесцветный газ с характерным острым запахом. Является сильнодействующим ядом и одним из сильнейших окислителей. При концентрациях озона выше 200 мкг/м<sup>3</sup> за 1 ч наблюдается раздражение слизистой оболочки глаз, горла, головная боль, при более высоких концентрациях — кашель, головокружение, резкий упадок сердечной деятельности.

Время жизни приземного озона в атмосфере составляет от нескольких дней до нескольких месяцев (Белан, 2008).

По данным доклада Европейского агентства по окружающей среде, четвертая оценка (Защита..., 2007) приземный озон и мелкодисперсные твердые частицы в настоящее время являются

основными загрязнителями атмосферного воздуха, представляющими значительную опасность здоровью населения.

### **Материалы и методы исследования**

Наблюдения за концентрациями приземного озона в Новосибирске осуществляет Западно-Сибирский центр мониторинга окружающей среды отечественным озономером 3.02.П-А, который основан на эффекте гетерогенной хемилюминесценции. Прибор в автоматическом режиме выдает значения концентраций приземного озона через каждые 20 мин. Точность измерений составляет  $\pm 6$  мкг/м<sup>3</sup> в диапазоне концентраций 0—30 мкг/м<sup>3</sup> и  $\pm 20\%$  для больших значений концентраций.

Наблюдения проводятся на одном посту в центре города внутри жилмассива.

Так как станций мониторинга приземного озона в РФ крайне мало, а в Сибири они практически отсутствуют, полученные данные наблюдений за концентрациями приземного озона в условиях промышленного мегаполиса Западной Сибири вызывает значительный интерес как у специалистов-экологов, так и у населения особенно с точки зрения загрязненности воздуха этой примесью.

Степень загрязнения воздуха приземным озоном была оценена путем сравнения фактически измеренных концентраций с предельно допустимой концентрацией. Предельно допустимые концентрации в РФ установлены на двух уровнях: для максимально разовых концентраций — ПДК<sub>мр</sub> и для среднесуточных — ПДК<sub>сс</sub>. В России нет критериев для оценки средних годовых и среднемесячных концентраций, поэтому они сравниваются с ПДК<sub>сс</sub>. Максимальные концентрации из разовых измерений сравниваются с ПДК<sub>мр</sub>.

Для приземного озона в РФ установлены следующие критерии чистоты атмосферного воздуха: ПДК<sub>мр</sub> = 160 мкг/м<sup>3</sup>, ПДК<sub>сс</sub> = 30 мкг/м<sup>3</sup> (Перечень, 2008).

## Результаты

В табл. 1 представлены среднемесячные и среднегодовые значения концентраций приземного озона, наблюдавшиеся в Новосибирске за 10 лет (2003—2012 гг.).

Как следует из табл. 1, среднегодовые концентрации приземного озона для большинства прошедших лет не превышали установленных санитарно-гигиенических критериев чистоты атмосферного воздуха и находились на уровне 0,2—0,9 ПДКсс. Превышения ПДК отмечались в 2009 и 2010 гг, когда среднегодовые концентрации приземного озона превысили стандарт качества атмосферного воздуха в 1,1 раза, что произошло за счет очень высоких концентраций, наблюдавшихся в весенне-летний период.

Анализ причин колебаний среднегодовых концентраций приземного озона в Новосибирске еще раз подтвердил высказанную ранее гипотезу, что его содержание формируется, в основном, за счет адвекции загрязненного воздуха с южных территорий Азии (Селегей и др., 2010). На рис. 1 показано изменение числа дней с формой циркуляции С в первом полугодии каждого календарного года рассматриваемого десятилетия, которое, в основном, совпадает с колебаниями среднегодовых концентраций приземного озона. В годы, когда число дней с формой циркуляции С наименьшее, наблюдались наименьшие значения приземных концентраций озона, и наоборот.

В годовом ходе концентраций приземного озона, как правило, наблюдается один максимум в мае и минимум в ноябре (см. табл. 1). Весенний максимум концентраций приземного озона является естественным и образуется за счет солнечной радиации и высоких температур воздуха в сочетании с низкими значениями относительной влажности. Такой ход концентрации приземного озона является преобладающим и типичным для умеренных широт. Однако, в отдельные годы наблюдается аномальный ход концентраций приземного озона.



Таблица 1

Среднемесячные и среднегодовые концентрации приземного озона в г. Новосибирске, мкг/м<sup>3</sup>

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XI I	Ср. за год	Максимум, дата
2003	25	<b>31</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>60</b>	<b>45</b>	<b>30</b>	14	8	5	3	5	28	202/ 15мая
2004	4	<b>56</b>	14	15	<b>45</b>	<b>51</b>	24	29	12	6	5	7	23	224/ 19 мая
2005	11	14	<b>39</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>35</b>	<b>31</b>	15	3	1	1	0	20	132/ 24/апреля
2006	0	4	0	1	29	23	16	9	3	1	1	4	7	86/ 11,13 мая
2007	3	4	5	3	7	8	10	10	5	2	1	6	5	70/ 19 июля
2008	3	11	18	<b>32</b>	<b>41</b>	<b>33</b>	<b>31</b>	28	17	10	8	9	20	127/ 16 мая
2009	17	21	<b>46</b>	<b>63</b>	<b>72</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	29	24	13	10	14	<b>33</b>	199/ 10 мая
2010	18	26	<b>57</b>	<b>76</b>	<b>73</b>	<b>47</b>	<b>30</b>	28	17	11	10	9	<b>34</b>	236/ 26 апреля
2011	9	14	34	44	48	62	27	26	6	6	1	0	23	153/ 2 июля
2012	7	10	<b>32</b>	<b>52</b>	<b>52</b>	<b>57</b>	<b>42</b>	28	14	4	2	1	25	195/ 1 августа
Среднее	10	19	<b>30</b>	<b>39</b>	<b>47</b>	<b>40</b>	29	22	11	6	4	6	22	236/ 26/апреля

Примечание.

Жирным шрифтом выделены среднемесячные концентрации, превышающие ПДКсс

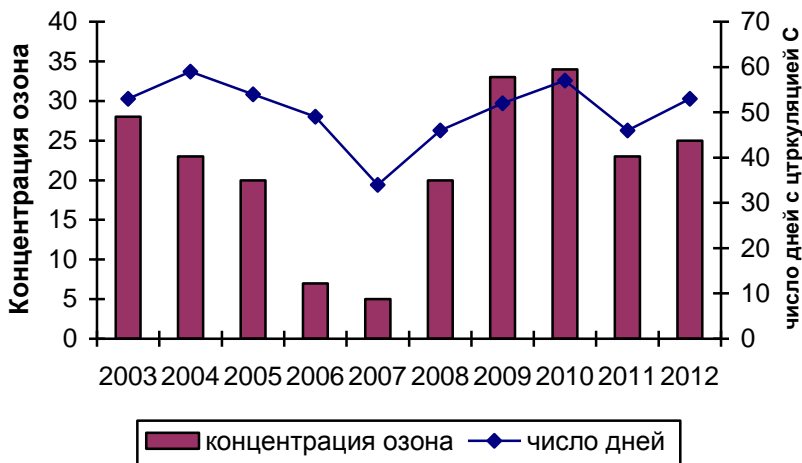


Рис.1. Ход среднего довых концентраций приземного озона ( $\text{мкг/м}^3$ ) и число дней с циркуляцией С в первом полугодии каждого года.

Например, в 2004 г. отмечалось три пика повышения концентраций: один в феврале, который по абсолютным значениям превысил весенне-летний (естественный), второй в июне и третий в августе. Аномально высокие концентрации приземного озона в феврале 2004 г. были связаны с поступлением теплого воздуха из субтропических стран Северного полушария, что установлено проведенным обратным траекторным анализом. В 2007 г. сдвиг максимума концентраций озона на июль-август был вызван холодной дождливой погодой, установившейся в мае-июне над территорией Западной Сибири. И только наступившая теплая погода в августе сформировала максимальное содержание приземного озона в этом месяце (Селегей и др., 2011).

Если оценивать загрязнение атмосферного воздуха Новосибирска по среднемесячным концентрациям приземного озона, то они с апреля по июнь включительно почти ежегодно превышали ПДКсс в 1,1—2,4 раза. Нередко такое явление отмечалось даже в феврале-марте.

В суточном ходе концентраций приземного озона наблюдается два максимума: ночной в интервале 03—04 ч и дневной между 13—16 ч местного времени. От месяца к месяцу в течение года интенсивность максимумов различна. Зимой на первое место выдвигается ночной максимум. В это время он более интенсивный и продолжительный по времени. Весной, летом и осенью, наоборот, более интенсивным и ярко выраженным становится дневной максимум (Селегей и др., 2011). Если дневной максимум образуется под действием солнечной радиации в полуденное и послеполуденное время в процессах фотохимии и интенсивного конвективного перемешивания, то природа ночного максимума в условиях г. Новосибирска до сих пор до конца не выяснена.

Минимальные значения концентраций озона наблюдаются в 8—9 ч утра и в 22—23 ч вечера и почти ежедневно могут опускаться до нулевых значений (при отсутствии адвекции извне) в любое время года. В отдельные годы периоды нулевых значений концентраций озона держатся по несколько суток подряд, и такие периоды наблюдаются довольно часто.

Если оценивать уровень загрязнения атмосферного воздуха за каждые сутки отдельно, то в табл. 2 показано количество дней с превышением концентраций приземного озона выше ПДК<sub>сс</sub> и ПДК<sub>мр</sub> в каждом месяце рассматриваемого ряда. Количество случаев со среднесуточными концентрациями озона, превысившими ПДК<sub>сс</sub>, составляет вполне внушительный ряд, достигая в 2009—2010 гг. 154—164 дня в году, т. е. в среднем почти каждый второй день в первых полугодиях календарных лет был загрязнен озоном выше нормы. В целом за рассматриваемое десятилетие количество дней, в которое были превышены национальные стандарты качества атмосферного воздуха в Новосибирске, составило 1017 случаев.

По этому поводу следует отметить, что оценка загрязнения атмосферного воздуха озоном по ПДК<sub>сс</sub>, равной 30 мкг/м<sup>3</sup>, вызывает определенную критику у специалистов-экологов, т. к. она необоснованно завышена, не адекватна ощущениям человека и требует пересмотра в сторону выравнивания с европейскими и мировыми стандартами.

Таблица 2

Количество дней с концентрацией O<sub>3</sub>, превышающей ПДКсс (числитель) и ПДКмр (знаменатель)

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее
<b>2003</b>	10/0	14/0	21/0	21/0	29/3	20/0	13/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	128/3
<b>2004</b>	0/0	21/0	1/0	0/0	16/3	27/0	5/0	12/0	1/0	0/0	0/0	2/0	85/3
<b>2005</b>	1/0	2/0	23/0	24/0	27/0	19/0	18/0	1/0	0/0	0/0	0/0	0/0	115/0
<b>2006</b>	0/0	0/0	0/0	0/0	6/0	5/0	1/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	12/0
<b>2007</b>	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
<b>2008</b>	0/0	0/0	3/0	16/0	23/0	17/0	16/0	11/0	2/0	0/0	0/0	0/0	88/0
<b>2009</b>	5/0	4/0	26/0	30/0	30/4	24/0	22/1	13/0	7/0	0/0	1/0	2/0	164/5
<b>2010</b>	5/0	12/0	25/0	30/2	31/3	19/1	14/0	12/0	5/1	0/0	0/0	1/0	154/7
<b>2011</b>	3/0	0/0	18/0	27/0	30/0	29/0	11/0	8/0	2/0	0/0	0/0	0/0	128/0
<b>2012</b>	0/0	1/0	18/0	27/2	30/0	30/2	23/2	13/1	2/0	0/0	0/0	0/0	144/7
<b>Сумма</b>	24/0	53/0	135/0	175/4	222/13	190/3	123/3	70/1	19/1	0/0	1/0	5/0	1017/25

Об ощутимом влиянии приземного озона на человека (реальное ухудшение здоровья и прежде всего функции легких) в умеренных широтах Северного полушария можно говорить только тогда, когда концентрация приземного озона превышает  $70 \text{ млрд}^{-1}$ , что в переводе на привычные единицы составляет примерно  $160 \text{ мкг/м}^3$ , т. е. соответствует российской ПДК<sub>мр</sub> (Белан, 2008).

Максимально разовые концентрации приземного озона в Новосибирске свой предел в  $160 \text{ мкг/м}^3$  превышали крайне редко. Таких случаев за прошедший десятилетний период было зафиксировано всего 25, причем не ежегодно. По 7 случаев было отмечено в 2010 и 2012 гг., 5 случаев в 2009 г. Чаще всего такие концентрации наблюдались в мае (см. табл. 2), но могли отмечаться и в другие весенне-летние месяцы. В 2005—2008, 2011 гг. случаев с концентрациями приземного озона выше  $160 \text{ мкг/м}^3$  вообще не было.

Абсолютный максимум концентраций приземного озона в г. Новосибирске составил  $236 \text{ мкг/м}^3$  ( $1,5 \text{ ПДК}_{\text{мр}}$ ) и наблюдался в 18 час 26 апреля 2010 года (см. таблицу 1). Этот максимум превысил пороговое значение образования фотохимических смогов, который в (Безуглая, 1986) для территории РФ был установлен на уровне  $210 \text{ мкг/м}^3$ . Однако фотохимических смогов в Новосибирске не наблюдалось.

В мире существуют различные стандарты качества атмосферного воздуха для оценки степени его загрязнения приземным озоном. Европейская секция ВОЗ для стран Европейского Союза в целях защиты населения от озона установила стандарт, который в среднем за 8 ч светлого времени суток не должен превышать  $100 \text{ мкг/м}^3$ . Стандарты качества воздуха по содержанию приземного озона в США составляют  $240 \text{ мкг/м}^3$  (средняя за 1 ч) и  $170 \text{ мкг/м}^3$  (средняя за 8 ч) (Защита, 2007).

В табл. 3 показаны результаты сравнительной оценки степени загрязнения атмосферного воздуха приземным озоном в г. Новосибирске по стандартам РФ, Европейской секции ВОЗ и стандартам США. По американским стандартам воздух Новосибирска по содержанию в нем приземного озона считается практически чистым.

Таблица 3

**Сравнительная оценка степени загрязнения атмосферного воздуха г. Новосибирска приземным озоном по различным национальным стандартам**

Год	Количество дней с концентрациями O <sub>3</sub>				
	> ПДКсс (среднесуточные)	> ПДКмр (максимальные)	более 100 мкг/м <sup>3</sup> непрерывно за 8 ч	более 170 мкг/м <sup>3</sup> непрерывно за 8 ч	более 240 мкг/м <sup>3</sup> за 1 ч
	<i>Российская Федерация</i>		<i>Стандарт Европейской секции ВОЗ</i>	<i>США</i>	
<b>2003</b>	128	3	9	1	0
<b>2004</b>	85	3	8	0	0
<b>2005</b>	115	0	1	0	0
<b>2006</b>	12	0	0	0	0
<b>2007</b>	0	0	0	0	0
<b>2008</b>	88	0	0	0	0
<b>2009</b>	164	5	11	0	0
<b>2010</b>	154	7	15	1	0
<b>2011</b>	128	0	5	0	0
<b>2012</b>	144	7	11	0	0
<b>Итого</b>	1017	25	60	2	0

За рассматриваемый период в городе наблюдались лишь две ситуации (15 мая 2003 г. и 26 апреля 2010 г.), когда концентрации озона превысили стандарт США ( $170 \text{ мкг/м}^3$  средняя за 8 ч). Случаев с концентрациями озона более  $240 \text{ мкг/м}^3$  (средняя за 1 ч) не отмечалось. По стандартам стран ЕС (средняя концентрация озона  $\geq 100 \text{ мкг/м}^3$  непрерывно за 8 ч светлого времени) выявили за этот же промежуток времени 60 дней с такими ситуациями, в то время как количество дней с концентрациями  $\geq$  ПДКсс по стандартам РФ за 10 лет составило 1017 случаев.

## Выводы

Подводя итог всему вышесказанному, можно сделать вывод, что в период с марта по июнь включительно каждый второй день месяца атмосфера г. Новосибирска загрязнена приземным озоном выше национальных санитарно-гигиенических стандартов качества атмосферного воздуха. В отдельных случаях, как это отмечалось в 2009, 2010 гг., эти периоды могут длиться без перерыва по 60 дней и более, что не адекватно ощущениям человека.

Оценка загрязнения атмосферного воздуха озоном в РФ по ПДКсс, равной  $30 \text{ мкг/м}^3$ , необоснованно завышена и требует пересмотра в сторону выравнивания ее с европейскими и мировыми стандартами, о чем мы уже писали (Селегей и др., 2012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Безуглая Э. Ю.* (1986). Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах —Л.: Гидрометеоиздат. 200 с.

*Белан Б. Д.* (2008). Тропосферный озон. 1. Свойства и роль в природных и техногенных процессах// Оптика атмосферы и океана. Т. 21. № 4. С. 299—322.

Защита окружающей среды Европы. Четвертая оценка. (2007) / Европейское агентство по окружающей среде. — Копенгаген. 452 с.

Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух (2008). — СПб: «Интеграл». 438 с.

*Селегей Т. С., Филоненко Н. Н., Ленковская Т. Н.* (2010). Зависимость концентраций приземного озона от адвективных факторов (на примере г. Новосибирска) // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 23. № 12. С. 1080—1086.

*Селегей Т. С., Филоненко Н. Н., Ленковская Т. Н.* (2011). Изменчивость содержания приземного озона в атмосферном воздухе Новосибирска и его зависимость от метеорологического факторов // *География и природные ресурсы*. № 6. С. 78—83.

*Селегей Т. С., Филоненко Н. Н., Ленковская Т. Н.* (2012). Оценка загрязнения атмосферного воздуха г. Новосибирска приземным озоном // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 25. № 2. С. 171—174.



**ЗОНАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ТЕПЛА И КОЛЕБАНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА  
НАД ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТЬЮ РОССИИ  
И ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ В ЦЕНТРАЛЬНЫЕ МЕСЯЦЫ  
СЕЗОНОВ ГОДА**

*Н. А. Лаевров*

Санкт-Петербургский государственный университет  
199178 Санкт-Петербург, 10-я линия В. О., 33-35  
e-mail: lavrov@mail.eu

Поступила в редакцию 15.01.2015  
Поступила после доработки 10.02.2015

В работе рассматриваются количественные характеристики зональных адвективных потоков тепла  $\vec{F}_Q$  через отрезок меридиана  $20^\circ$  в. д., заключенных в участке меридиана, заключенном между  $50\text{--}70^\circ$  с. ш. в центральные месяцы сезонов года за период 1900—2006 гг., а также влияние потоков тепла на средние взвешенные значения приземной температуры воздуха в трех долготных зонах европейской части России (ЕЧР) и прилегающих районах. Зональный поток тепла через участок меридиана, расположенного западнее западной границы ЕЧР, характеризует поток тепла, поступающий на ЕЧР из районов Северной Атлантики.

Поток тепла  $\vec{F}_Q$  через единицу площади определяется соотношением:

$$\vec{F}_Q = \rho c_p T \vec{V}$$

Зональный приземный поток тепла в слое высотой в 1 метр через участок меридиана длиной  $\Delta\phi R$ , равен:

$$(F_Q)_{\text{зон}} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \rho c_p T u R d\varphi, \quad (1)$$

где:  $\varphi$  — географическая широта (в рад.),

$\rho$ ,  $c_p$ ,  $T$  — плотность, изобарическая теплоемкость, приземная температура воздуха соответственно,

$u$  — зональная составляющая скорости приземного ветра,

$R$  — радиус Земли.

Если пренебречь турбулентными процессами и ограничиться осредненными во времени циркуляционными потоками тепла, то из (1) получим:

$$(F_Q)_{\text{зон}} = \rho c_p R \bar{T} \bar{u} \Delta\varphi, \quad (2)$$

где черта сверху здесь и в дальнейшем есть пространственное и временное осреднения.

Зональную составляющую скорости ветра  $u$  можно в геострофическом приближении представить в виде:

$$u_g = -\frac{0,97\delta P}{\sin\varphi} \text{ (м/с)},$$

где:  $\delta P$  — меридиональная составляющая градиента давления в гПа/555 км,

0,97 ( $\text{кг}^{-1}\text{м}^3\text{с}$ ) — коэффициент, учитывающий единицы измерения.

Теперь (2) примет вид:

$$(F_Q)_{\text{зон}} = -\frac{0,97}{\sin\varphi} \rho c_p R \bar{T} \bar{\delta P} \Delta\varphi \text{ (Дж/с)}. \quad (3)$$

Представляя двадцатиградусный отрезок долготы состоящим из двух десятиградусных интервалов  $50\text{—}60^\circ$  с. ш. и  $60\text{—}70^\circ$  с. ш., объединяя все постоянные величины в один коэффициент  $\gamma$ , равный  $0,7 \cdot 10^6$  ( $\text{м}^3\text{с}^{-1}\text{К}^{-1}$ ), вместо (3) получим выражения для зональных потоков тепла через эти участки меридиана, заключенные между широтами:

$$(F_Q)_{\text{зон}}^{50-60} = \gamma \frac{T_{20,50} + T_{20,55} + T_{20,60}}{3} \cdot \frac{P_{20,50} - P_{20,60}}{\sin 55^\circ} \text{ (Дж/с)}, \quad (4)$$

$$(F_Q)_{\text{зон}}^{60-70} = \gamma \frac{T_{20,60} + T_{20,65} + T_{20,70}}{3} \cdot \frac{P_{20,60} - P_{20,70}}{\sin 65^\circ} \text{ (Дж/с)}, \quad (5)$$

$$(F_Q)_{\text{зон}} = \frac{(F_Q)_{\text{зон}}^{50-60} + (F_Q)_{\text{зон}}^{60-70}}{2} \text{ (Дж/с)}. \quad (6)$$

Здесь  $T$  — абсолютная температура воздуха (К),  $P$  — приземное атмосферное давление (гПа). Индексы при величинах  $T$ ,  $P$  есть значения температуры и давления воздуха на долготе  $20^\circ$  в. д. и на широтах  $50$ — $70^\circ$  с. ш.

Используя среднемесячные значения температуры (Land air temperature, электр.ресурс; Absolute temperatures, электр. ресурс), осредненной по пятиградусным широтно-долготным квадратам, и давления (Grid-point Pressure, электр. ресурс), пересчитанного в пятиградусные узлы широтно-долготной сетки, за 1900—2006 гг., получим с помощью (4) — (6) зональные потоки тепла через участок меридиана, заключенный между  $50$ — $70^\circ$  с. ш. в центральные месяцы сезонов, а также средние взвешенные значения температуры воздуха в пределах широтной зоны  $50$ — $70^\circ$  с. ш. и трех долготных зон  $20$ — $40^\circ$  в. д.,  $40$ — $60^\circ$  в. д.,  $60$ — $80^\circ$  в. д., охватывающих ЕЧР и прилегающие районы.

На рис. 1 представлены временные ряды и линейные тренды потоков тепла и аномалий температуры воздуха в  $20$ — $40^\circ$ -й долготной зоне (западная часть ЕЧР) в январе. Прослеживается хорошая аналогия эволюций потоков тепла и аномалий температуры. Коэффициент корреляции  $r$  между потоками тепла и аномалиями температуры составляет  $0,76$ . Имеет место положительный тренд как аномалий температуры, так и потоков тепла. Последний объясняется, по-видимому, положительным трендом температуры воздуха в зоне  $20^\circ$  в. д.

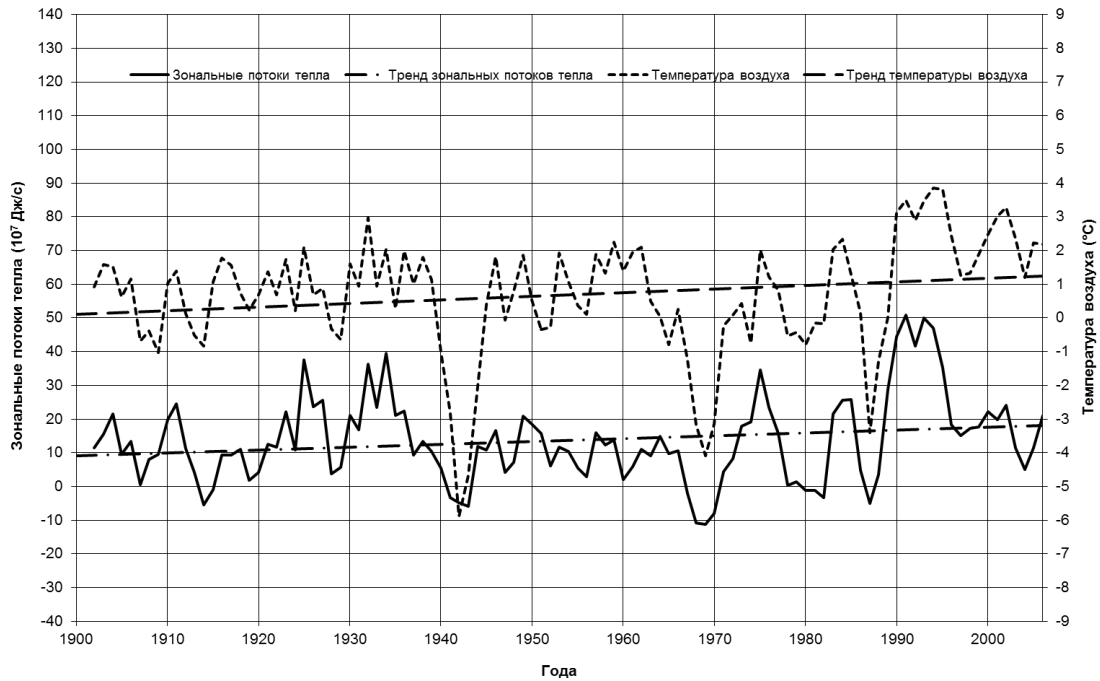


Рис. 1. Температура воздуха и зональный поток тепла в январе в западных районах ЕЧР.

В таблице 1 приведены основные сведения о зональных потоках тепла, аномалиях температуры воздуха и их взаимосвязи в изучаемых нами регионах. Наибольшие средние значения потоков тепла ( $1,7 \cdot 10^9$  Дж/с) наблюдаются в январе, несколько меньшие значения имеют место в октябре, наименьшие — в июле. В западном регионе коэффициенты корреляции даже в весенне-летний период оказались значимы. Полученная эволюция аномалий температуры согласуется с результатами ранее опубликованных работ (Афанасьев, 1967; Лавров, 2006; Доклад, 2013).

Таблица 1

**Средние значения зональных потоков тепла, тренды и коэффициенты корреляции потоков тепла с аномалиями температуры воздуха в долготных зонах ЕЧР и в Западной Сибири**

Месяц	Зональные потоки тепла		Тренды и коэффициент корреляции аномалий температуры воздуха с потоками тепла					
	Средние значения, $10^9$ Дж/с	Тренды, $10^6$ Дж/с/100 лет	20–40° в. д.		40–60° в. д.		60–80° в. д.	
			Тренд, град./100 лет	г	Тренд, град./100 лет	г	Тренд, град./100 лет	г
Январь	1,7	8,3	1,1	<u>0,76</u>	1,6	<u>0,52</u>	2,0	<u>0,42</u>
Апрель	0,38	0,0	1,9	<u>0,29</u>	1,3	0,12	2,0	-0,02
Июль	0,36	0,0	0,6	<u>0,34</u>	0,5	0,12	0,6	0,02
Октябрь	1,27	2,8	1,2	<u>0,65</u>	1,1	<u>0,27</u>	1,2	-0,03

Примечание.

г – коэффициент корреляции между аномалиями температуры воздуха и потоками тепла;

подчеркнутые значения – значения, значимые на 5% уровне.

Естественно, что наиболее тесные связи между зональными потоками тепла и аномалиями температуры наблюдаются в западном

(20—40° в. д.) регионе ЕЧР и в осенне-зимние сезоны. Однако в январе влияние зональных потоков тепла существенно ( $r = 0,42$ ) сказывается даже в западном регионе Сибири (60—80° в. д.).

Безусловно, величины зональных потоков тепла связаны с атмосферными процессами и аномалиями температуры поверхности океана Северной Атлантики. Этот вопрос требует особого изучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Афанасьев А. Н.* (1967). Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР.— М.: Наука. 423 с.

*Лавров Н. А.* (2006). Многолетние колебания температуры, осадков и характеристик циркуляции атмосферы на севере европейской части России // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Вып. 1.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год. (2013). — М.: Росгидромет. 86 с.

Absolute temperatures for the base period 1961–90 // Climatic Research Unit, University of East Anglia.— <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> [Электр. ресурс].

Grid-Point Pressure Data for the Northern Hemisphere // Climatic Research Unit, University of East Anglia.— <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/pressure/> [Электр. ресурс].

Land air temperature anomalies on a 5° by 5° grid-box basis // Climatic Research Unit, University of East Anglia.— <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> [Электр. ресурс].

## **СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ, ПРИХОДЯЩАЯ НА ВЕРХНЮЮ ГРАНИЦУ АТМОСФЕРЫ, И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ**

*В. М. Федоров<sup>1</sup>, Н. К. Кононова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

<sup>2</sup>Институт географии Российской Академии Наук  
19017 Москва, Старомонетный переулок, 29  
e-mail: ipyf@mail.ru  
ninakononova@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.07.2014  
Поступила после доработки 30.01.2015

### **Введение**

Солнце является основным источником энергии атмосферных процессов (Воейков, 1903; Шулейкин, 1953; Кондратьев, 1965; Будыко, 1974; Манин, 1982). Отмечается, что неравномерность в приходе солнечной радиации на различные широты является основной причиной циркуляционных процессов в атмосфере (Кац, 1960; Лоренц, 1970; Пальмен, Ньютон, 1973; Погосян, 1976; Гилл, 1986). Однако несмотря на очевидную связь циркуляционных процессов с солнечной радиацией, детально она пока не исследована.

Схемы типизации атмосферных процессов представляют непрерывный процесс общей циркуляции атмосферы в виде чередования устойчивых многократно повторяющихся фрагментов — однородных процессов, охватывающих полушарие или значительные по площади регионы. Наибольшую известность в отечественной метеорологии получили типизации макромасштабных атмосферных процессов Вангенгейма — Гирса (Вангенгейм, 1935, 1952; Гирс, 1971,

1974) и Б. Л. Дзерdzeевского, В. М. Курганской, З. М. Витвицкой (Дзерdzeевский и др., 1946). В связи с четкостью формализации циркуляционных ситуаций, широкой пространственно-временной информативностью (разработана для всего Северного полушария, охватывает период с 1899 года по настоящее время) и общей доступностью Календаря последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) (<http://www.atmospheric-circulation.ru>; Кононова, 2009, 2014), в данной работе используется типизация Б. Л. Дзерdzeевского, В. М. Курганской, З. М. Витвицкой.

В качестве профилирующего признака в этой типизации принято соотношение зональной и меридиональной составляющих циркуляции над полушарием. Выделяется 13 основных типов ЭЦМ, а с учетом их разновидностей (выделяемых на основе сезонных или региональных различий) — 41 ЭЦМ. По характеру соотношения зонального и меридионального переносов во внетропических широтах Северного полушария ЭЦМ объединены в четыре группы: зональную (арктические вторжения — блокирующие процессы отсутствуют, 2 или 3 прорыва южных циклонов в разных секторах полушария, типы ЭЦМ 1 и 2); нарушения зональности (один блокирующий процесс на полушарии, от 1 до 3 прорывов южных циклонов, типы ЭЦМ 3—7); меридиональную северную (от 2 до 4 одновременных блокирующих процессов в разных секторах полушария, от 2 до 4 прорывов южных циклонов, типы ЭЦМ 8—12) и меридиональную южную (циклоническая циркуляция на полюсе, блокирующих процессов нет, от 2 до 4 прорывов южных циклонов, проникающих в Арктику, тип ЭЦМ 13).

Группы зональная и нарушения зональности отражают зональный перенос в атмосфере, группы меридиональная южная и меридиональная северная — меридиональный перенос воздушных масс.

Таким образом, в непрерывном циркуляционном процессе в атмосфере выделяются элементарные циркуляционные механизмы, группы циркуляции и циркуляционные сезоны (Дзерdzeевский, 1957), являющиеся основными структурными элементами рассматриваемой типизации. Время, частота проявления и продолжительность действия



тех или иных ЭЦМ отражают особенности общей циркуляции атмосферы, определяют характер погоды каждого конкретного места. Продолжительность действия групп циркуляции, характер соотношения зональных и меридиональных форм циркуляции являются важнейшими макроциркуляционными характеристиками климата при рассмотрении его многолетних изменений.

Вариации поступающей к Земле солнечной радиации определяются двумя основными причинами, имеющими различную физическую природу. Исследования вариаций солнечной радиации, связанной с изменением физической активности Солнца, имеют давнюю историю. Вопрос о существовании связи между изменением солнечной активности и климатом уже в течение продолжительного времени остается дискуссионным (Абдусаматов, 2009; Dergachev, 2009; Dudok de Wit, Watermann, 2010; Schurer et al., 2014). В этой работе изменение активности Солнца не учитывается.

Связанные с небесно-механическими процессами вариации солнечного потока (в формате представлений астрономической теории климата) исследуются на весьма продолжительных масштабах времени. При этом учитываются подверженные вековым возмущениям орбитальные элементы — долгота перигелия и эксцентриситет, а также наклон оси вращения Земли. Эти возмущения имеют весьма значительные по продолжительности периоды вариаций (Миланкович, 1939; Шараф, Будникова, 1968, Berger, Loutre, 1991; Монин, Шишков, 2000). Расчеты приходящей солнечной радиации в диапазоне периодических возмущений были начаты в Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова (Borisenkov et al., 1983, 1985). Однако дальнейшего развития эти исследования не получили.

### **Методика расчетов**

По исходным данным астрономических эфемерид (JPL Planetary and Lunar Ephemerides) DE-405/406 (<http://ssd.jpl.nasa.gov>) рассчитывались значения приходящей солнечной радиации (при отсутствии атмосферы) за тропические годы, полугодия и сезоны года

в различные широтные зоны (протяженностью в  $5^\circ$  широты) земного эллипсоида в интервале от 3000 г. до н. э. до 2999 г. н. э. Точность эфемерид по расстоянию между Землей и Солнцем составляет  $10^{-9}$  а. е. (или 0,1496 км), по времени 1 с (или 0,0000115 сут). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80) с длинами полуосей, равными 6378137 м (большие) и 6356752 м (малая). Расчеты производились с использованием ряда формул, среди которых основным было выражение:

$$I_{nm}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left( \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(H, \varphi) \left( \int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(H, t, \varphi, \alpha) d\alpha \right) d\varphi \right) dt, \quad (1)$$

где  $I$  — приходящая солнечная радиация за элементарный  $n$ -й фрагмент  $m$ -го тропического года (Дж);  $\sigma$  — площадной множитель ( $\text{м}^2$ ), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал  $\sigma(H, \varphi) d\alpha d\varphi$  — площадь бесконечно малой прямоугольной ячейки эллипсоида;  $\alpha$  — часовой угол,  $\varphi$  — географическая широта, выраженные в радианах;  $H$  — высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли (м);  $(H, \varphi, t, \alpha)$  — инсоляция в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $t$  — время (с).

Шаги при интегрировании составляли: по долготе  $1^\circ$ , по широте  $1^\circ$ , по времени 1/360 часть продолжительности тропического года. Значение солнечной постоянной принималось равным  $1367 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . При расчетах учитывались изменения расстояния между Землей и Солнцем и продолжительности периода обращения Земли (продолжительности тропического года) в связи с периодическими возмущениями орбитального движения Земли (Федоров, 2013, 2014; Fedorov, 2012). Изменение активности Солнца при этом не учитывалось. По результатам расчетов для периода с 2950 г. до н. э. по 2950 г. н. э. была сформирована база данных приходящей (в отсутствии атмосферы) солнечной радиации в широтные зоны Земли (протяженностью в 5 градусов) с шагом по времени в 1/12 часть тропического года (<http://www.solar-climate.com>).

## Результаты и их обсуждение

Полученные значения приходящей на поверхность земного эллипсоида в отсутствии атмосферы солнечной радиации сопоставлялись с продолжительностью действия групп циркуляции (Кононова, 2009; <http://www.atmospheric-circulation.ru>). Сравнение данных по продолжительности действия групп циркуляции и значений солнечной радиации, поступающей на поверхность земного эллипсоида в отсутствии атмосферы, проводилось на основе корреляционного анализа. Корреляционная связь исследовалась по рядам с постоянной продолжительностью в 100 лет (вековым интервалам) с последовательным смещением их (с шагом равным 1 году) от начала массива фактических данных (1899 г.) к настоящему времени (2013 г.). Таким образом, определялись значения коэффициента корреляции (R) для интервалов 1899—1998 гг., 1900—1999 гг. и т.д., всего для 16 вековых интервалов (рис. 1).

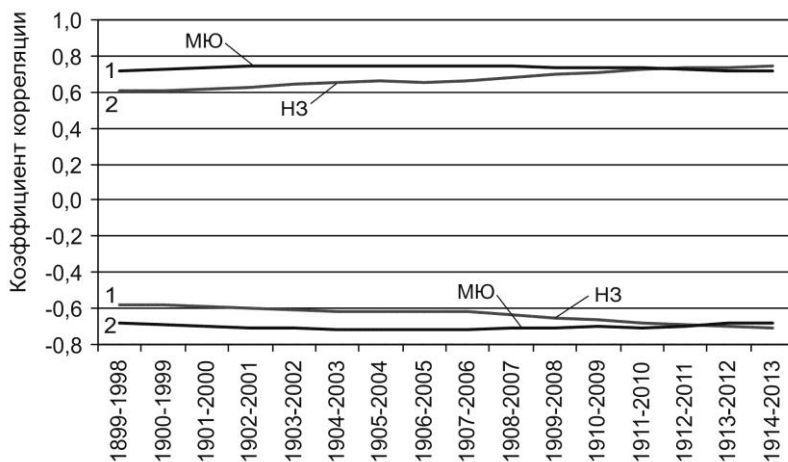


Рис. 1. Изменение коэффициента корреляции продолжительности групп циркуляции с разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную области Северного полушария (1) и с приходящей в Северное полушарие солнечной радиацией (2) по вековым интервалам.

МЮ — группа меридиональной южной циркуляции, НЗ — группа нарушения зональности.

Оказалось, что достаточно высокая корреляция с приходящей солнечной радиацией и разностью приходящей в экваториальную и полярную область Северного полушария отмечается для двух групп циркуляции: меридиональной южной и нарушения зональности (рис. 1). Среднее значение  $R$  приходящей радиации с продолжительностью действия группы нарушения зональности (НЗ) составляет 0,673, с группой меридиональной южной циркуляции (МЮ) –0,703. Среднее значение  $R$  разности радиации, приходящей в экваториальную и полярную область (отражающие межширотный градиент солнечной радиации), с продолжительностью НЗ составляет –0,635, с продолжительностью МЮ 0,756. Таким образом, отклик продолжительности действия групп циркуляции НЗ и МЮ на приходящую солнечную радиацию (в отсутствии атмосферы) и на разность солнечной радиации, поступающей в экваториальную и полярную область Северного полушария Земли, противоположный. Учитывая, что приходящая солнечная радиация в современную эпоху сокращается, а разность солнечной радиации, поступающей в экваториальную и полярную область, увеличивается, можно сделать вывод о тенденциях продолжительности группы НЗ к сокращению, а группы МЮ — к увеличению (Федоров, 2014).

Как следует из графиков (рис. 1), в массиве выделяются вековые интервалы с 1911—2010 гг. и т. д. до 1914—2013 гг. (всего 4 интервала), на которых значения  $R$  становятся для группы НЗ высокими и весьма близкими (табл. 1). Изменения  $R$  по этим 4-м вековым интервалам составляют для группы НЗ 1,09 % (приходящая радиация) и 1,31 % (разность), для группы МЮ 1,25 % и 1,03 % соответственно. Эти (достоверные) вековые интервалы приняты за основу для составления уравнений линейной регрессии.

На основе уравнений регрессии, полученных для достоверных вековых интервалов, для групп циркуляции МЮ и НЗ были рассчитаны соответствующие значения радиации значения продолжительности групп на период с 1850 по 2050 гг. (рис. 2). В первом столбце таблицы приведена корреляция с приходящей солнечной радиацией, во втором — с разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную области.

Таблица 1

**Средние значения коэффициента корреляции солнечной радиации и продолжительности групп циркуляции (вероятность 0,99)**

Корреляция	НЗ		МЮ	
По всему ряду (1899—2013 гг.)	0,712	-0,682	-0,718	0,747
Среднее по вековым интервалам	0,673	-0,635	-0,703	0,756
Среднее по достоверным вековым интервалам	0,736	-0,694	-0,693	0,754

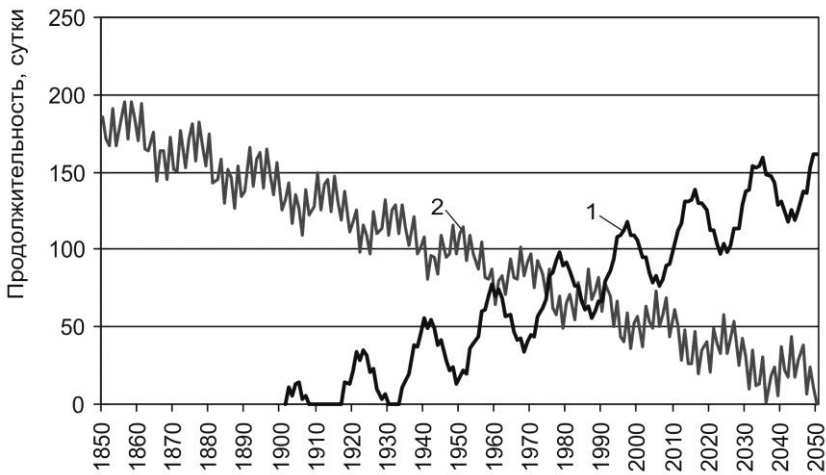


Рис. 2. Распределение рассчитанных значений продолжительности групп циркуляции для Северного полушария.

1 — МЮ, 2 — НЗ.

Полученные распределения отражают вековые тенденции изменения продолжительности действия групп циркуляции, определяемые сочетанием прецессионного (приблизительно 25,7 тыс. лет) и нутационного (19-летнего) циклов, регулирующих поступление солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы (Федоров, 2012, 2013, 2014). Все рассчитанные значения продолжительности действия групп циркуляции характеризуются высокими значениями  $R$  с фактическими значениями продолжительности (за период с 1899 по

2013 г.). Значение  $R$  составляет для группы МЮ 0,747 (для всех достоверных вековых интервалов), для группы НЗ – 0,715.

Детальное сравнение рассчитанных значений продолжительности групп циркуляции с фактическими значениями (рис. 3, 4) проводилось для периода, обеспеченного фактическими данными, представленными в Календаре последовательной смены ЭЦМ за 1899—2013 г. ([www.atmospheric-circulation.ru](http://www.atmospheric-circulation.ru)).

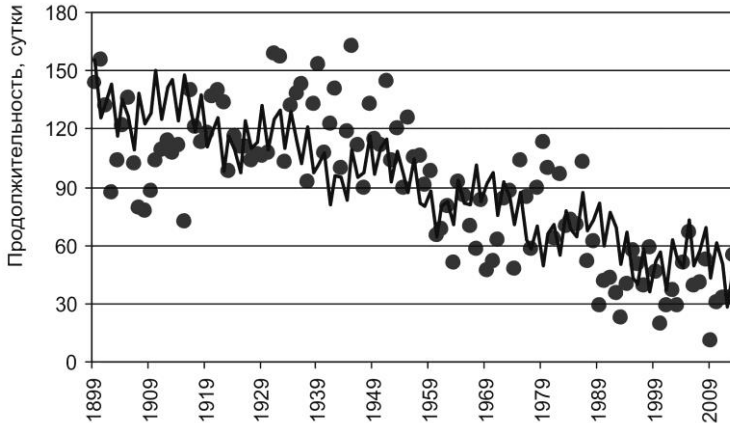


Рис. 3. Распределение фактических (точки) и рассчитанных значений продолжительности группы нарушения зональности.

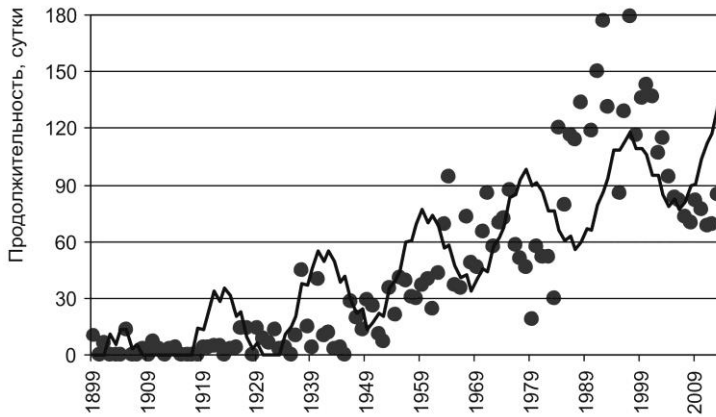


Рис. 4. Распределение фактических (точки) и рассчитанных значений продолжительности группы меридиональной южной циркуляции.

Средняя величина продолжительности (для этого периода) по фактическим данным для группы меридиональной южной циркуляции составляет 47,2 суток, по рассчитанным данным — 48,5. Для группы нарушения зональности — 89,5 и 91,9 суток соответственно.

Среднее по модулю расхождение между фактическими и рассчитанными значениями продолжительности на интервале с 1899 по 2013 гг. составляет для группы МЮ — 23,1 суток, для группы НЗ — 20,4 суток. Это составляет 49,0 % и 22,8 % от соответствующих среднегодовых значений продолжительности по фактическим данным.

Также проводились расчеты на основе уравнения регрессии в виде полинома второй степени. Корреляция рассчитанных и фактических значений продолжительности в вековых интервалах для группы МЮ — 0,744, для группы НЗ — 0,742. Сравнение рассчитанных данных с фактическими данными на интервале с 1899 по 2013 гг. в этом случае показывает, что аппроксимация существенно не отличается от линейной (разница существенна на интервалах прогноза и реконструкции). Так, среднегодовое значение по расчетным данным для продолжительности группы меридиональной южной циркуляции составило 48,1 суток (при среднегодовой продолжительности по фактическому ряду 47,2 суток), для группы нарушения зональности — 90,8 суток (89,5). Среднегодовое значение расхождения составляет для группы меридиональной южной циркуляции — 23,0 суток, для группы нарушения зональности — 19,8 суток. Это 48,8 % и 22,1 % от среднегодовой продолжительности соответствующих фактических рядов.

В случае линейной зависимости продолжительность действия группы меридиональной южной циркуляции может в 2050 году составить около 160 суток, а продолжительность действия группы нарушения зональности сократиться до значений, близких к нулевым. В случае квадратичной связи продолжительность группы МЮ циркуляции может увеличиться приблизительно до 234 суток, а группа НЗ не будет проявляться в циркуляционных процессах (рис.5). По отношению к 2013 году в случае линейной связи с солнечной радиацией увеличение продолжительности действия группы МЮ

циркуляции составит 90,6 %, в случае квадратичной связи — 175,9 %. Продолжительность действия группы НЗ в обоих случаях сократится на 100 %.

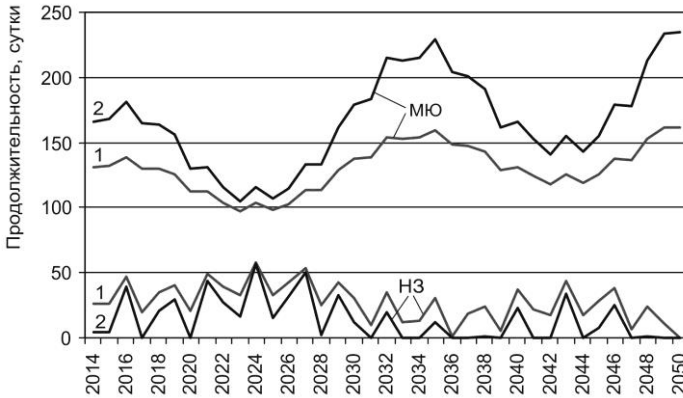


Рис. 5. Распределение значений продолжительности групп циркуляции в интервале с 2014 по 2050 гг.

1 — по линейному уравнению регрессии 2 — по полиному 2-й степени.

Также на вековых интервалах исследовалась связь продолжительности зональной (З+НЗ) и меридиональной (МС+МЮ) циркуляции. Соотношение продолжительности этих форм циркуляции составляет основной принцип типизации циркуляционных процессов в атмосфере (Дзердзеевский и др., 1946; Дзердзеевский, 1954, 1968). Продолжительность зональной и меридиональной циркуляции сопоставлялась с приходящей (в отсутствии атмосферы) солнечной радиацией и разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область Северного полушария. Значения  $R$  продолжительности меридиональной циркуляции (МС+МЮ) с разностью положительные, с приходящей радиацией отрицательные. По всему массиву данных (с 1899 по 2013 гг.) среднее значение  $R$  составляет 0,627, с приходящей радиацией  $-0,665$  (рис. 6). Значения  $R$  продолжительности зональной циркуляции (З+НЗ) по всему массиву, наоборот, с приходящей радиацией положительные (среднее равно 0,631), с разностью – отрицательные (среднее составляет  $-0,593$ ).



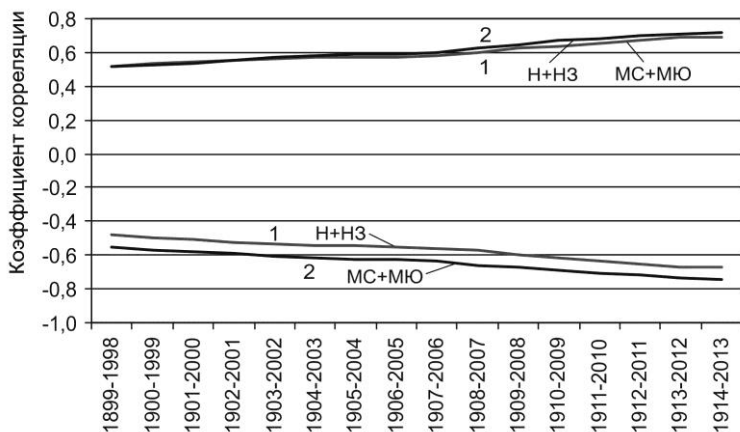


Рис. 6. Распределение значений коэффициента корреляции продолжительности групп циркуляции с разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область Северного полушария (1) и с приходящей в Северное полушарие солнечной радиацией (2) по вековым интервалам.

МЮ+МС — меридиональная циркуляция,  
 З+НЗ — зональная циркуляция.

Среднее значение  $R$  по всем вековым интервалам для продолжительности меридиональной циркуляции и приходящей радиации составляет  $-0,645$ . Для продолжительности зональной циркуляции и приходящей солнечной радиации среднее значение по всем вековым интервалам положительное и составляет  $0,614$ . Для достоверных интервалов значения  $R$  возрастают до  $-0,725$  и  $0,703$  соответственно. По уравнениям регрессии для 4-х достоверных вековых (1911—2010 и т.д. до 1914—2013) интервалов были рассчитаны значения продолжительности зональной и меридиональной циркуляции для интервала с 1850 по 2050 гг. Значения  $R$  фактических величин продолжительности с рассчитанными по всему массиву данных с 1899 по 2013 составила для меридиональной циркуляции (МС+МЮ) —  $0,682$ , для зональной

циркуляции (З+НЗ) — 0,650. Распределение рассчитанных значений представлено на рис. 7.

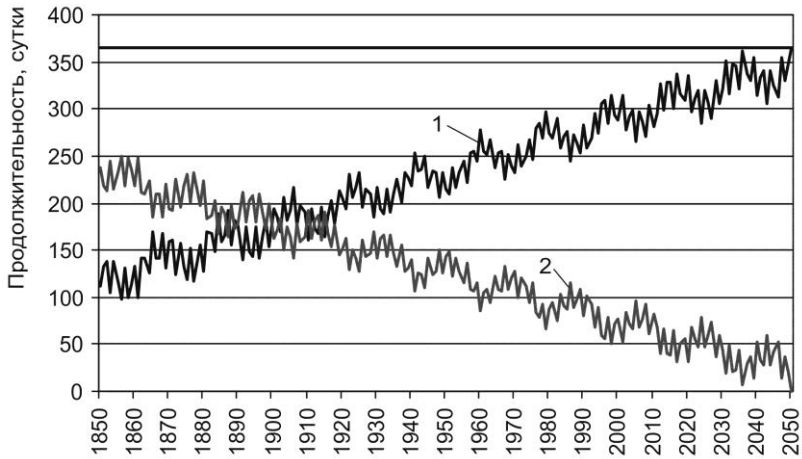


Рис. 7. Распределение продолжительности меридиональной (МС+МЮ) — 1 и зональной (З+НЗ) — 2 циркуляции.  
Горизонтальная линия — продолжительность года.

Сравнение фактических и расчетных значений (рис. 8, 9) также проводилось на интервале с 1899 по 2013 гг. (обеспеченном фактическими данными). Среднегодовое значение продолжительности меридиональной циркуляции (МС+МЮ) на этом интервале составляет 244,1 суток по фактическим значениям и 239,3 суток — по рассчитанным значениям. Для продолжительности зональной циркуляции (З+НЗ) эти значения равны 115,6 суток и 120,4 суток соответственно. Среднегодовое расхождение фактических и рассчитанных значений продолжительности для меридиональной циркуляции характеризуется значением в 28,3 суток, для зональной циркуляции в 27,9 суток. Это составляет 11,6 % от среднегодовой продолжительности меридиональной циркуляции и 24,1 % от среднегодовой продолжительности зональной циркуляции. Расхождения продолжительности меридиональной и зональной циркуляции характеризуются значением R равным  $-0,98$ .

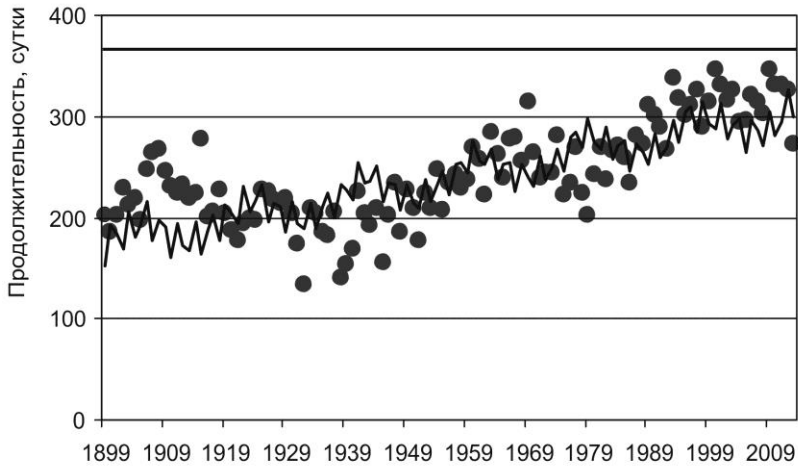


Рис. 8. Распределение фактических (точки) и рассчитанных (ломаная линия) значений продолжительности меридиональной циркуляции в Северном полушарии.

Горизонтальная линия — продолжительность года.

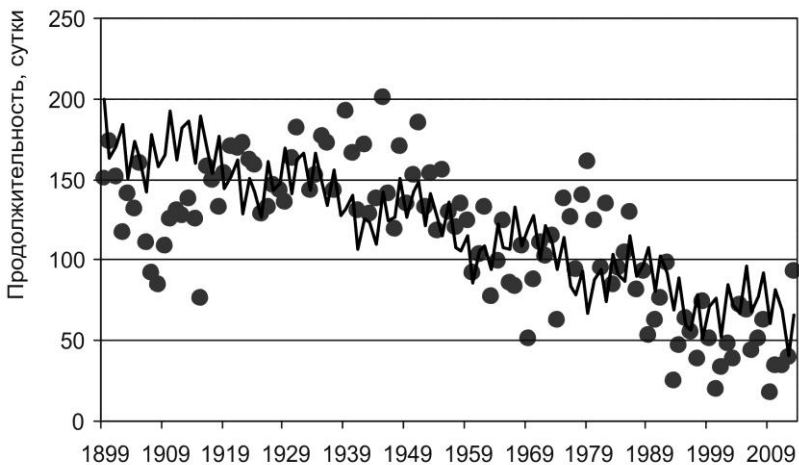


Рис. 9. Распределение фактических (точки) и рассчитанных (ломаная линия) значений продолжительности зональной циркуляции в Северном полушарии.

Также выполнялись расчеты продолжительности циркуляции на основе уравнения регрессии в виде полинома второй степени. Среднегодовые значения для рассчитанных величин продолжительности меридиональной циркуляции оказались равными 241,8 суток (фактические 244,1), для зональной циркуляции 118,1 суток (фактические 115,5). Значение R рассчитанных значений продолжительности с фактическими значениями для меридиональной циркуляции составило 0,741, для зональной циркуляции 0,712. Среднегодовое расхождение фактических и рассчитанных значений продолжительности меридиональной циркуляции характеризуется величиной 25,5 суток, зональной — 25,1 суток, что составляет 10,4 % и 21,7 % от соответствующей среднегодовой продолжительности циркуляции.

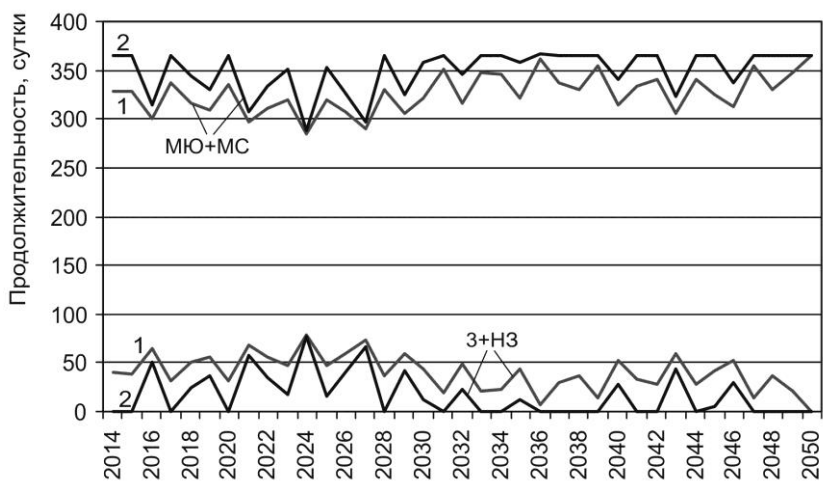


Рис. 10. Распределение продолжительности меридиональной и зональной циркуляции в интервале с 2014 по 2050 гг.

1 — по линейному уравнению регрессии 2 — по полиному 2-й степени.

Рассчитанные на период с 2014 по 2050 гг. значения продолжительности зональной и меридиональной циркуляции показывают, что меридиональная циркуляция будет существенно преобладать над зональной циркуляцией в общей циркуляции

атмосферы. Минимальная продолжительность меридиональной циркуляции на этом интервале ожидается близкой к 280 суткам, а максимальная продолжительность зональной составит около 75 суток. В интервале от 2020 до 2030 гг. ожидается некоторое увеличение продолжительности зональной циркуляции и сокращение меридиональной (рис. 10).

### Заключение

Определена связь приходящей солнечной радиации и разности солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярную области Северного полушария Земли (в отсутствии атмосферы) с продолжительностью зональной (З+НЗ) и меридиональной (МС+МЮ) циркуляции, соотношение которых является профилирующим признаком в типизации Б. Л. Дзердзеевского.

Определена связь приходящей солнечной радиации и разности солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную области Северного полушария Земли (в отсутствии атмосферы), с продолжительностью отдельных групп циркуляции (меридиональной южной и нарушения зональности).

Определен различный характер отклика продолжительности зональной и меридиональной циркуляции и отдельных групп циркуляции (меридиональной южной и нарушения зональности) на изменение значений приходящей солнечной радиации и разности солнечной радиации, поступающей в экваториальную и полярную область Северного полушария.

Созданы основы для прогноза продолжительности зональной и меридиональной циркуляции и отдельных групп циркуляции (меридиональной южной и нарушения зональности) в Северном полушарии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Абдусаматов Х. И.* (2009). Солнце диктует климат Земли. — СПб.: Логос. 197 с.

*Будыко М. И.* (1974). Изменение климата. — Л.: Гидрометеиздат. 280 с.

*Вангейгем Г. Я.* (1935). Опыт применения синоптических карт к

изучению характеристик климата. — Л.: Гидрометеиздат. 125 с.

*Вангенгейм Г. Я.* (1952). Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Труды ААНИИ. Т. 34. 314 с.

*Воейков А. И.* (1903). Метеорология. — СПб.: Издание картографического заведения А. Ильина. 780 с.

*Гилл А.* (1986). Динамика атмосферы и океана. — М.: Мир. Т. 1. 398 с.

*Гирс А. А.* (1971). Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. — Л.: Гидрометеиздат. 280 с.

*Гирс А. А.* (1974). Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. — Л.: Гидрометеиздат. 488 с.

*Дзержевский Б. Л.* (1957). Циркуляционные схемы сезонов года в северном полушарии // Известия АН СССР. Серия географическая. № 1. с. 36 — 55.

*Дзержевский Б. Л.* (1968). Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии / Материалы метеорологических исследований. Изд. ИГ АН СССР и Междувед. Геофиз. комитета при Президиуме АН СССР. — М. 240 с.

*Дзержевский Б. Л.* (1975). Общая циркуляция атмосферы и климат. — М.: Наука. 288 с.

*Дзержевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М.* (1946). Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов. // Труды н.-и. учреждений Гл. упр. Гидрометеорол. Службы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. ЦИП. — М., Л.: Гидрометиздат. 80 с.

*Дзержевский Б. Л., Монин А. С.* (1954). Типовые схемы общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии и индекс циркуляции // Известия АН СССР. Серия геофизика. № 6. С. 562—574.

*Кац А. Л.* (1960). Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. — Л.: Гидрометеиздат. 270 с.

*Кондратьев К. Я.* (1965). Актинометрия. — Л.: Гидрометеиздат. 692 с.

*Кононова Н. К.* (2009). Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзержевскому / отв. ред. А.Б. Шмакин. — М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.

*Кононова Н. К.* (2014). Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария в конце XX — начале XXI века и их отражение в климате // Междисциплинарный научный журнал Сложные системы. № 2 (11). С. 13—41.

*Лоренц Э. Н.* (1970). Природа и теория общей циркуляции атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 260 с.

*Миланкович М.* (1939). Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. — М.–Л.: ГОНТИ. 208 с.

*Монин А. С.* (1982). Введение в теорию климата. — Л.: Гидрометеиздат. 246 с.

*Монин А. С., Шишков Ю. А.* (2000). Климат как проблема физики // Успехи физ. Наук. Т. 170. № 4. С. 419—445.

*Пальмен Э. Ньютон Ч.* (1973). Циркуляционные системы атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 616 с.

*Погосян Х. П.* (1976). Циклоны. — Л.: Гидрометеиздат. 148 с.

*Федоров В. М.* (2012). Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // Астрономический вестник. Т. 46. № 2. С. 184—189.

*Федоров В. М.* (2013). Межгодовые вариации продолжительности тропического года // Доклады РАН. Т. 451. № 1. С. 95—97.

*Федоров В. М.* (2014). Периодические возмущения и малые вариации солярного климата Земли // Доклады РАН, Т. 457. № 2. С. 222—225.

*Шараф Ш. Г., Будникова Н. А.* (1968). Колебания солнечного облучения Земли, вызванные вековыми изменениями элементов земной орбиты // ДАН СССР. Т. 182. № 2. С. 291—293.

*Шулейкин В. В.* (1953). Физика моря. — М.: АН СССР, 990 с.

*Berger A., Loutre M. F.* (1991). Insolation values for the climate of the last 10 million years? // Quatern. Sci. Rev. V. 10. P. 297—317.

*Borisenkov; E. P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V.* (1983). On some characteristics of insolation changes in the past and the future // Climatic Change. № 5. P. 237—244.

*Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Eddy J. A.* (1985). Combined Effects of Earth Orbit Perturbations and Solar Activity on Terrestrial Insolation. Part 1: Sample Days and Annual Mean Values // Journal of the atmospheric sciences. V. 42. № 9. P. 933—940.

*Dergachev V.A.* (2009). Cosmogenic radionuclides  $^{14}\text{C}$  and  $^{10}\text{Be}$ : solar activity

and climate // Bull. of the Russian Academy of Sciences. Physics. V.73. № 3. P. 381—383.

*Dudok de Wit T., Watermann J.* (2010) Solar forcing of the terrestrial atmosphere // *Geoscience*. V. 342. P. 259—272.

*Fedorov V.M.* (2012). Interannual Variability of the Solar Constant // *Solar System Research*. V. 46. № 2. P. 170 —176

<http://www.atmospheric-circulation.ru> — Кононова Н .К. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX — начале XXI вв. — Электронный ресурс.

<http://ssd.jpl.nasa.gov> — NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Электронный ресурс национального аэрокосмического агентства США.

<http://www.solar-climate.com> — Федоров В. М. Исследования солярного климата Земли. — Электронный ресурс.

*Schurer A., Tett S. F. B., Hegerl G. C.* (2014). Small influence of solar variability on climate over the past millennium // *Nature Geoscience*. V. 7. P. 104—108.



УДК 551.465.7, 539.186, 551.576.1

**Влияние эволюции климатических характеристик в XXI веке на газообмен через поверхность Баренцева моря (численное моделирование).**  
Бортковский Р. С., Надёжина Е. Д., Стернзат А. В., Павлова Т. В., Пикалёва А. А., Егоров Б. Н. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 7—26.

Современные оценки потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  через морскую поверхность недостаточно надежны. В связи с важностью решения проблемы газопереноса в условиях изменяющегося климата активно продолжается изучение этих процессов. Временные и пространственные распределения потоков газа через поверхность «вода-воздух» исследовались в настоящей работе с помощью новой версии модели газопереноса. В качестве входных параметров модели газопереноса использованы климатические данные региональной климатической модели ГГО и глобальной климатической модели ЕСНАМ5/MPI-OM. Выполнены оценки интегрального годового стока  $\text{CO}_2$  через поверхность Баренцева моря. Проведен анализ изменения потоков углекислого газа и кислорода над акваторией к середине XXI века.

*Ключевые слова:* газообмен «вода-воздух», кислород, моделирование, изменение климата, Баренцево море.

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 27.

**Результаты первых камерных измерений потоков метана на гидрометеорологической обсерватории «Тикси».** Ивахов В. М., Кароль И. Л., Киселев А. А., Зинченко А. В., Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Лаурила Т., Аурела М. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 27—41.

Метан ( $\text{CH}_4$ ) является одним из важнейших парниковых газов. Оценки эмиссии метана до настоящего времени имеют высокую степень неопределенности, особенно для переувлажненных районов Арктической зоны. В работе приводятся и анализируются данные камерных измерений потока метана в районе обсерватории «Тикси», полученные в 2013-2014 гг. в ходе трех экспедиций. Концентрация метана определялась с помощью анализа проб воздуха на газовом хроматографе, а также *in situ* с помощью лазерного спектрометра. Измерения проводились на 13 различных микрорельефных участках. Средние значения потоков метана для увлажненной, сухой и каменистой тундры составили  $2,35 \pm 2,12$  мг/м<sup>2</sup>/час;  $0,01 \pm 0,06$  мг/м<sup>2</sup>/час и  $-0,07 \pm 0,05$  мг/м<sup>2</sup>/час соответственно.

*Ключевые слова:* парниковые газы, поток метана, обсерватория «Тикси».

Табл. 3. Ил. 3. Библ. 18.

**О влиянии аэрозолей естественного происхождения на температуру кристаллизации капель воды.** Синькевич А. А., Павар С. Д., Куров А. Б., Волков Н. Н., Михайловский В. Ю., Веремей Н. Е., Гопалакришнан В. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 42—49.

Приводятся результаты исследований по изучению влияния частиц песка, глины и сажи на температуру кристаллизации капель воды при иммерсионном замерзании. Представлены данные о форме частиц и составе образцов, полученные с помощью электронного микроскопа и энергодисперсионного спектрометра. Приводятся данные лабораторных экспериментов, проведённых в малой холодильной камере. Показано, что наличие частиц рассматриваемых веществ приводит к заметному повышению температуры кристаллизации капель. Представлены зависимости температуры кристаллизации от концентрации веществ. Исследования проводились в рамках работ по изучению влияния аэрозолей естественного происхождения на микроструктуру облаков.

*Ключевые слова:* аэрозоли, капли воды, лабораторные эксперименты, температура кристаллизации.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 11.

УДК 551.594+551.576

**Исследование характеристик грозовых облаков и грозовой активности по данным наземных наблюдений и численного моделирования ( на примере станции г. Санкт-Петербурга).** Довгалюк Ю. А., Торопова М. Л., Веремей Н. Е. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 50—61.

Описаны результаты исследования характеристик грозовых облаков, развивавшихся над Санкт-Петербургом в период 2001 - 2010 годов, на базе использования полной нестационарной численной модели конвективного облака малой размерности и обобщенных экспериментальных данных об облаках.

Показано, что обобщенные данные о высоте нижней и верхней границы облаков и их вертикальной мощности, вертикальных скоростях и профилях водности в грозовых облаках над Санкт-Петербургом.

По данным наземных метеорологических наблюдений рассчитано число дней с грозой, являющееся основной климатической характеристикой грозовой активности в указанном районе.

*Ключевые слова:* гроза, конвективные (грозовые) облака, характеристики облаков, численное моделирование, число дней с грозой.

Табл. 4. Ил. 5. Библ. 36.

УДК 319.61.126

**Восстановление микроструктурных характеристик жидких осадков с помощью активно-пассивного зондирования.** Линкова А. М., Хлопов Г. И. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 62—80.

Рассматривается метод восстановления параметров жидких осадков с помощью активно-пассивного зондирования на основе двухчастотного радара и радиометра. Получены выражения для активно-пассивного зондирования дождей в виде системы трех интегральных уравнений и разработан алгоритм решения обратной задачи численными методами. Проведено численное моделирование активно-пассивного зондирования жидких осадков в диапазоне интенсивности до 25 мм/ч и для длин волн радара 8,2 мм и 3,2 см, и 3,4 см для радиометра.

*Ключевые слова:* активно-пассивное зондирование, гамма-распределение, интенсивность дождя, отраженная мощность, радиояркостная температура, двухчастотный радар, радиометр.

Табл. 1. Ил. 6. Библ. 8.

УДК 551.594.21

**Исследование вариаций напряженности электрического поля во время гроз с помощью методов вейвлет-анализа.** Герасименко Н.И., Зайнетдинов Б. Г., Морозов В. Н., Попов И. Б. Труды ГГО. Вып. 576 С. 81—91.

Рассматривается задача обработки данных вариаций напряженности электрического поля, полученных во время гроз, на основе использования методов вейвлет-анализа. Представлены графические материалы, иллюстрирующие результаты обработки для различных вейвлетов. Полученные результаты обсуждаются.

*Ключевые слова:* вариации напряженности электрического поля, грозовые облака, вейвлет-анализ.

Ил. 4. Библ. 9.

УДК 551.589

**Грозы на европейском севере – вероятные погодно-климатические угрозы и риски.** Грищенко И. В., Рюмина Т. Н. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 92—101.

Рассмотрен ряд статистических закономерностей в распределении гроз на территории Архангельской области. Рассчитаны линейные тренды средней повторяемости явления. Показаны вероятные риски, связанные с грозовой деятельностью и методы управления ими.

*Ключевые слова:* Гроза, квазимеридиональный фронт, изменение климата, молниезащита, грозопеленгатор.

Ил. 2. Библ. 9.

УДК 551.553

**Изменение режима ветра в Томске в начале XXI века.** Кижнер Л. И., Серая Н. Ю. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 102—113.

Рассматриваются основные характеристики ветра за десятилетний период (2001–2010 гг.) по данным гидрометеорологической станции и результатам наблюдений специальной ТОР-станции Института оптики атмосферы СО РАН. Выполнено сравнение полученных характеристик с климатическими данными справочников, обобщенными за более ранний период. Показано, что последний период отличается уменьшением среднемесячной и среднегодовой скорости ветра, количества дней с сильным ветром. Отмечены изменения в направлении ветра.

*Ключевые слова:* характеристики ветра, климатические изменения.

Табл. 6. Ил. 3. Библ. 11.

УДК 504.35

**Характеристики ветра в дни пусков ракет космического назначения на космодроме «Байконур.** Золотухина О. И., Горбатенко В. П., Вареник П. А. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 114—128.

Параметры ветра у поверхности земли и в свободной атмосфере оказывают существенное влияние на выполнение работ с ракетой космического назначения (РКН) в период ее подготовки на стартовом комплексе, на проведение пуска и на ее полет. Представлен анализ синоптических условий и характеристик ветра до высоты 25 км в дни, переносов пусков РКН на космодроме «Байконур». Основное внимание уделено поиску общих условий образования ветров, представляющих опасность для пуска РКН.

*Ключевые слова:* параметры ветра у земли, характеристики ветра в свободной атмосфере.

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 9.

УДК 551.583 +551.577

**Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской области.** Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Труды ГГО. Вып. 576 С. 129—152.

Для территории Томской области исследованы структура и динамика режима атмосферных осадков: вероятностные показатели, непрерывная продолжительность периодов с осадками и без осадков, тенденции изменения. Рассчитаны индексы экстремальности, повторяемость опасных явлений, обусловленных выпадением значительных сумм осадков. Результаты исследования могут быть использованы для оценки современной климатической составляющей хозяйственного комплекса территории, при составлении долгосрочных прогнозов.

*Ключевые слова:* Томская область, атмосферные осадки, повторяемость, изменчивость, непрерывная продолжительность, индексы экстремальности.

Табл. 8. Ил. 5. Библ. 15.

УДК 504.064

**Методика метеозависимой геоэкологической оценки состояния окружающей среды и экологического риска для персонала аэродрома государственной авиации.** Мазуров Г. И., Татаринов В. В., Базарский О. В., Томилов А. А. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 153—165.

По результатам инструментальных наблюдений загрязнения воздуха и почвы проведен анализ их зависимости от различных метеоусловий при выбросах загрязняющих веществ на аэродроме Воронеж. Впервые выделяются зоны, в которых высоких уровней загрязнения, в которых необходимо обслуживающему персоналу работать в респираторах и ограниченное время.

*Ключевые слова:* загрязняющие вещества, пространственный источник эмиссии, обеспечение полетов, аэродром государственной авиации, метеорологические условия

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 9.

УДК 551.510.42

**Приземный озон в Новосибирске.** Селегей Т. С., Филоненко Н. Н., Ленковская Т. Н. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 166—176.

Проведен анализ максимальных, среднесуточных, среднемесячных и годовых значений концентраций приземного озона в г. Новосибирске за период 2003-2012 гг. Произведена оценка загрязнения атмосферного воздуха г.Новосибирска приземным озоном с использованием стандартов качества атмосферного воздуха РФ, США и Европейской секции ВОЗ. Большая разница в оценках уровней загрязнения атмосферного воздуха приземным озоном требует пересмотра отечественных стандартов качества атмосферного воздуха с целью приближения их к международным стандартам.

*Ключевые слова:* концентрация приземного озона, загрязнение атмосферного воздуха, национальные стандарты качества атмосферы.

Табл. 3. Ил. 1. Библ. 7.

УДК 531.88

**Зональные потоки тепла и колебания температуры воздуха над европейской частью России и Западной Сибирью в центральные месяцы сезонов года.** Лавров Н. А. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 177—182.

Рассматриваются величины зональных адвективных потоков тепла, направленных на европейскую часть России и прилегающие районы в центральные месяцы сезонов, и их связь с колебаниями температуры воздуха.

*Ключевые слова:* Зональные потоки тепла, колебания температуры воздуха, корреляция.

Таб. 1. Рис. 1. Библ. 6.



УДК 551.513.2

**Солнечная радиация, приходящая на верхнюю границу атмосферы, и изменчивость циркуляционных процессов в Северном полушарии.**  
Фёдоров В. М., Кононова Н. К. Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 183—200.

Проанализирована связь продолжительности зональной и меридиональной циркуляции атмосферы Северного полушария в типизации Б.Л. Дзердзеевского с вариациями солнечной радиации. Выявлена тенденция увеличения продолжительности меридиональной циркуляции (и меридиональной южной группы) и сокращения продолжительности зональной циркуляции (и группы нарушения зональности) в период с 1850 по 2013 гг. Проведенные расчёты позволяют оценить тенденцию изменения продолжительности составляющих циркуляции атмосферы с 2014 по 2050 гг.

*Ключевые слова:* солнечная радиация, циркуляционные процессы в атмосфере, типизация, группы циркуляции, зональная и меридиональная циркуляция.

Табл. 1. Ил. 10. Библ. 34.

**Climate evolution impacts on sea-air gas exchange in the Barents Sea during the 21st century (numerical simulation).** Bortkovski R. S., Nadyozhina E. D., Sternsat A. V., Pavlova T. V., Pikaleva A. A., Egorov B. N. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 7—26.

The evaluations of air-sea CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> fluxes are very uncertain. The problem of air-sea gas exchange under the climate change conditions is especially important and the active investigations of gas exchange processes go on. In this paper the temporal and space distributions of gas fluxes are analysed using the new version of gas exchange model. The climatic information of Regional Climatic Model (RCM) MGO and of the Global Climatic Model ECHAM5/MPI-OM was used as the input parameters of gas exchange model. The net annual uptake of CO<sub>2</sub> in the Barents Sea was calculated. The projections of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> fluxes variability at the surface of the Barents Sea in the middle of 21<sup>st</sup> century have been analysed.

*Keywords:* Air-sea gas exchange, oxygen, modeling, climate change, Barents Sea.

Tab. 1. Fig. 5. Ref. 27.

**The results of the first chamber CH<sub>4</sub> flux measurements at hydrometeorological observatory “Tiksi”.** Ivakhov V. M., Karol I. L., Kisilev A. A., Zinchenko A. V., Paramonova N. N., Privalov V. I., Laurila T., Aurela M. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 27—41.

Methane (CH<sub>4</sub>) is one of the most important greenhouse gas. Estimates of methane emissions up to data have a high degree of uncertainty, especially for wetland areas of the Arctic. The chamber CH<sub>4</sub> flux data obtained during three field campaigns in 2013-2014 years at observatory “Tiksi” are given and analyzed. Methane concentration in air samples was measured by means of gas chromatograph; also *in situ* measurements were conducted with laser spectrometer. The measurements were performed at 13 different microrelief sites. The average values of methane fluxes for moist, dry and rocky tundra accounted to  $2,35 \pm 2,12$  mg / m<sup>2</sup> / hour;  $0,01 \pm 0,06$  mg / m<sup>2</sup> / h and  $-0,07 \pm 0,05$  mg / m<sup>2</sup> / h respectively.

*Keywords:* greenhouse gases, methane flux, observatory “Tiksi”.

Tab. 3. Fig. 3. Ref. 18.

**An impact of natural aerosols on crystallization temperature of water drops.**

Sinkevich A. A., Pawar S. D., Kurov A. B., Volkov N. N., Mikhailovskiy V. Yu., Veremey N. E., Gopalakrishnan V. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 42—49.

Laboratory experiments were carried out to investigate the effects of sand, clay and soot (black carbon) particles on the crystallization temperature of water drops. Data on particle habits and composition, obtained with electron microscope and energy-dispersive spectroscope, are presented. The experiments were carried out inside a small cooling chamber. They have shown that particles under study lead to significant increase of the crystallizing temperature of water drops. The relationships between crystallizing temperature and concentration of particles are presented. The research was carried out under the problem of the impact of natural aerosols on cloud microstructure.

*Keywords:* aerosols, water drops, laboratory experiments, crystallization.

Fig. 1, Tab. 3, Ref. 11.

**Research of characteristics of storm clouds and thunderstorm activity according to ground-based observations and numerical modeling (for example, the station of Saint-Petersburg).** Dovgaluk Yu. A., Toropova M. L., Veremey N. E. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 50—61.

Describes the numerical experiments to study the parameters of storm clouds over St. Petersburg for the period 2001-2010 by the method developed at the Department of Physics of clouds and atmospheric electricity of Voeikov Main Geophysical Observatory on the basis of complete non-stationary numerical model of convective clouds of small dimension and generalized experimental data on the clouds. The presented results of simulation experiments contain summary data on the cloud base and cloud top height and clouds' vertical thickness, vertical velocity and water content profiles in storm clouds over St. Petersburg. According to the surface weather observations were also obtained climatic characteristics of thunderstorm activity in the region.

*Key words:* thunderstorm, convective (thunderstorm) clouds, parameters of clouds, numerical simulation

Tab.4. Fig. 5. Ref. 36.

**Retrieval of microstructure characteristics of liquid precipitation by active-passive remote sensing.** Linkova A. M., Khlopov G. I. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 62—80.

The method for retrieval of rain parameters by active-passive remote sensing is considered in the paper based on double frequency radar and radiometer. The expressions for active-passive sensing of rains are obtained in the form of system of three integral equations and algorithm for solution of inverse problem by numerical methods is proposed. Numerical simulation of active-passive remote sensing of liquid precipitation was performed in the range of intensity up to 25 mm/h and for radar wavelengths 8.2 mm and 3.2 cm, and radiometer – 3.4 cm.

*Keywords:* active-passive remote sensing, Gamma distribution, rain intensity, reflected power, brightness temperature, double frequency radar, radiometer.

Tab.1. Fig. 6. Ref. 8

**Investigation of variations of electric field strength during thunderstorms by methods of wavelet analysis.** Gerasimenko N. I., Zainetdinov B. G., Morozov V. N., Popov I. B. Proceeding of MGO. 2014. V. 576. 81—91.

Problem of data processing of variations of electric field strength received during thunderstorms using wavelet methods is considered. Draws illustrated results processing for different wavelets are presented. Received results are discussed.

*Key words;* variations of electric field strength , thunderstorms, wavelet analysis.

Fig. 4. Ref. 9.

**Thunderstorms in the European North. Probable weather and climate threats and risks** Grischenko I. V., Rumina T. N. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 92—101.

Considered a number of statistical regularities in the distribution of thunderstorms in the Arkhangelsk region. Calculated linear trends of the average frequency of occurrence of the phenomenon. Showing the probable risks associated with thunderstorm activity and methods of their control.

*Keywords:* Thunderstorms, kvazimeridionalny front, climate change, lightning finder, lightning protection.

Fig. 2. Ref. 9

**Changing the wind in Tomsk in early twenty-first century.** Kizhner L. I., Seraya N. U. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 102—113.

The main characteristics of the wind for the ten-year period (2001–2010) according to the weather service stations and the results of observations of special top-station of the Institute of Atmosphere were investigated. Comparison of the obtained characteristics with the climate data of directories, generalized for the earlier period were performed. It is shown that the latter period differs in reducing of the wind speed and of the number of days with strong winds. Changes in wind direction were marked.

Keywords: wind characteristics, climatic changes.

Tab. 6. Fig. 3. Ref. 11

**Features wind during the delayed of space rockets at the cosmodrome «Baikonur».** Zolotukhina O. I., Gorbatenko V. P., Varenik P. A. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 114—128.

The parameters of the wind on the Earth's surface and in the free atmosphere have a significant impact on the successful launch of a space rocket and its flight. Presents an analysis of synoptic conditions and characteristics of the wind to a height of 25 km, during days of delayed start of space rockets at the cosmodrome "Baikonur". The focus is on finding the same conditions of formation of winds, dangerous to start space rockets.

Keywords: wind parameters at the earth's surface, wind characteristics in the free atmosphere.

Tab.1. Fig. 5. Ref. 9

**Contemporary climate regime of precipitation in the Tomsk region.**

Barashkova N. K., Volkova M. A., Kuzhevskaya I. V. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 129—152.

Structure and dynamics of the regime of precipitation (probability characteristics, continuous duration of periods with and without precipitation and trends) have been investigated for the Tomsk region. Climatic Indices and frequency of dangerous weather events associated with precipitation were calculated. The results can be used to estimate climate trends and for drawing up long-term and medium-term forecasts.

*Keywords:* Tomsk region, precipitation, frequency, variability, continuous duration, climatic Indices.

Tab.8. Fig. 5. Ref. 15

**Methodology of meteodependent geo-ecological assessment of the environment and environmental risk to personnel of state aviation airfield.**

Mazurov G. I., Tatarinov V. V., Bazarsky O. V., Tomilov A. A. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 153—165.

According to the results of instrumental observations of air pollution and soil analyzes them according to the different weather conditions at the emission of pollutants at the airport of Voronezh. For the first time allocated zones in which high levels of pollution, which require maintenance personnel to work in respirators and limited time.

*Keywords:* pollutants, the spatial emission source, flight service, the state aviation airfield, meteorological conditions

Tab.1. Fig. 5. Ref. 9

**Ground-level ozone in Novosibirsk city.** Selegey T. S., Filonenko N. N., Lenkovskaya T. N. Proceedings of MGO. 2015. V. 576. P. 166—176.

The analysis of the maximum, daily average, monthly average and annual average values of ozone concentrations in Novosibirsk for the period of 2003-2012 was performed. Novosibirsk city air pollution was assessed using the RF, the US, and the WHO European Section ground-level ozone air quality standards. Great variance in ground-level ozone air pollution assessment requires a revision of national ambient air quality standards with the aim of bringing them in line with internationally agreed standards.

*Keywords:* ground-level ozone concentration, air pollution, national ambient air quality standards.

Fig. 1, Tab. 3, Ref. 7.

**Zonal heat fluxes of heat and air temperature fluctuations over the European part of Russia and Western Siberia in the central months of the year seasons.** Lavrov N. A. Proceedings of MGO 2015. V. 576. P. 177—182.

In this article we consider the values of the zonal advective heat fluxes directed to the European part of Russia and adjacent areas in the central months of the seasons, and their relation to fluctuations in air temperature.

*Keywords:* Zonal heat fluxes, air temperature fluctuations, correlation.

Tabl. 1. Fig. 1. Ref. 6.

**Solar radiation at the top of the atmosphere and the variability of atmospheric processes in the Northern Hemisphere.** Fedorov V. M., Kononova N. K. Proceedings of MGO 2015. V. 576. P. 183—200.

The relation between the duration of the zonal and meridional atmospheric circulation over Northern Hemisphere in classification by BL Dzerdzeevskii with variations of solar radiation was analyzed. The tendency of increasing the total duration of the meridional circulation (and the southern meridional group) and decreasing the total duration of the zonal circulation (and disturbance of zonal group) in the atmosphere of the Northern Hemisphere during the period from 1850 to 2013 was identified. The calculations allow us to estimate the trend in the duration of the components of atmospheric circulation from 2014 to 2050.

Keywords: solar radiation, circulation processes in the atmosphere, classification, circulation groups, zonal and meridional circulation.

Tab. 1. Fig. 10. Ref. 34.