

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

561

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

Санкт-Петербург
2010

Адрес: 194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Телефон: (812) 297 43 90

ФАКС: (812) 297 86 61

e-mail: director@main.mgo.ri.ru

web site: <http://www.mgo.rssi.ru>

УДК 551.5(09)

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. Кобышева, д-р физ.-мат. наук В. П. Мелешко,
д-р геогр. наук А. В. Мещерская, д-р физ.-мат. наук, профессор О. М. Покровский,
д-р тех. наук, профессор В. Д. Степаненко, д-р физ.-мат. наук, профессор Г. Г. Шукин,
канд. физ.-мат. наук С. С. Чичерин,
канд. геогр. наук Е. Л. Махоткина (секретарь редколлегии)

Содержатся результаты теоретических и экспериментальных исследований по современным 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.

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. V. D. Stepanenko, Dr. G. G. Shchukin,
Dr. C. C. 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.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>В. П. Мелешко, В. М. Катцов, И. Л. Кароль.</i> К вопросу о предотвращении глобального потепления посредством рассеивания сульфатного аэрозоля в атмосфере	7
<i>Е. Л. Генихович, Т. В. Павлова, В. М. Катцов.</i> О комплексировании ансамбля климатических моделей	28
<i>Р. В. Бекряев.</i> Дискриминация климатических моделей. Вероятностный подход	47
<i>Р. С. Бортковский, Б. Н. Егоров.</i> Оценка применимости одномерной модели верхнего квазиоднородного слоя в ключевых районах Мирового океана	67
<i>Е. В. Мекрюкова, Е. Л. Генихович.</i> К оценке эффективности различных химических механизмов при моделировании процессов трансформации загрязняющих веществ в атмосфере	84
<i>Т. В. Костарева, В. И. Кириллова, В. Д. Николаев, Л. Р. Сонькин.</i> Прогноз экстремально высоких уровней загрязнения воздуха в городах промышленного региона	92
<i>М. М. Борисенко, Е. О. Гобарова, Е. Л. Жильцова.</i> Исследование климатических ресурсов энергии ветра в нижнем 200-метровом слое атмосферы над территорией Ленинградской области	104
<i>Е. М. Акентьева, Е. В. Иванова.</i> Оценка влияния ожидаемого к середине XXI века изменения климата на потенциал гидроэнергетики (на примере Архангельской области)	115
<i>В. В. Стадник, Л. М. Псаломщикова, О. В. Трофимова, И. Н. Шанина.</i> Поступление суммарной солнечной радиации на приемные поверхности гелиоустановок на территории России	124
<i>Д. В. Смирнов.</i> Климатические ресурсы низкопотенциального тепла земли, доставляемого тепловыми насосами	138
<i>Н. А. Зиновьева, Г. Б. Пигольцина.</i> Систематизация метеорологических станций по условиям местоположения с помощью метода кластерного анализа	145
<i>И. В. Морозова.</i> Возможные аспекты использования формулы Сивкова	154
<i>Э. Ю. Безуглая, И. А. Воробьева, М. В. Полуэктова.</i> Исследование химических процессов в атмосфере по данным мониторинга в городах	164

<i>В. Ю. Окоренков.</i> Оптимальное управление состоянием парка метеорологических средств измерений	185
<i>В. Ю. Окоренков.</i> Метрологическая надежность метеорологических информационно-измерительных систем	194
<i>А. А. Кохановский.</i> Пространственное распределение размеров ледяных частиц у верхней кромки урагана	213
<i>Г. Г. Щукин, [В. Д. Степаненко], А. В. Снегуров.</i> Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой	223
<i>А. П. Доронин, М. Ю. Белевич, В. Н. Козлов, Е. Е. Кильчанский, Р. В. Шереметьев.</i> Исследование фазового состояния внутримассовой и фронтальной облачности над Северо-Западным регионом России применительно к проблеме активных воздействий	242
<i>В. И. Привалов, Н. Н. Парамонова.</i> Газохроматографические измерения концентрации водорода в атмосферном воздухе	266
<i>И. В. Грищенко.</i> Очень сильные морозы на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа	276
Нина Владимировна Кобышева. К 85-летию со дня рождения	285
Эмма Юрьевна Безуглая. К 80-летию со дня рождения	287
Памяти Леонида Вульфовича Руховца	290

CONTENTS

<i>V. P. Meleshko, V. M. Kattsov, I. L. Karol.</i> On prevention of global warming through dispersion of sulfate aerosols in the stratosphere...	7
<i>E. Genikhovich, T. Pavlova, V. Kattsov.</i> On combining climate models in ensembles	28
<i>R. V. Bekryaev.</i> Discrimination of climate models, probabilistic approach	47
<i>R. S. Bortkovski, B. N. Egorov.</i> The estimate of the one-dimensional model applicability to the upper quasi-homogeneous layer in World Ocean key regions	67
<i>E. V. Mekrulykova, E. L. Genikhovich.</i> On estimation of efficiency of different chemical mechanisms used for modeling of transformation of atmospheric pollutants	84
<i>T. V. Kostareva, V. I. Kirillova, V. D. Nikolaev, L. R. Sonkin.</i> The forecast of extremely high levels of air pollution in the cities of the industrial region.....	92
<i>M. M. Borisenko, E. O. Gobarova, E. L. Zhiltsova.</i> Wind energy climatic resource investigations at lower 200 m atmosphere layer over Leningrad oblast.....	104
<i>E. M. Akentyeva, E. V. Ivanova.</i> The impact of expected climate change on mini hydroenergetics potential by the middle of 21 th century (the Arkhangelsk Region case study)	115
<i>V. V. Stadnik, L. M. Psalomshicova, O. V. Trofimova, I. N. Shani-na.</i> Solar radiation income on receiving surfaces of heliosystems over the Russian territory.....	124
<i>D. V. Smirnov.</i> Climatic resources of low-potential geothermal heating supplied by thermal pumps	138
<i>N. A. Zinovyeva, G. B. Pigoltsina.</i> Locality systematization of meteorological stations involved method of cluster analyzes.....	145
<i>I. V. Morozova.</i> Possible aspects of using Sivkov formula	154
<i>E. Yu. Bezuglaya, I. A. Vorobyeva, M. V. Poluektova.</i> Study of chemical processes in the atmosphere using the urban monitoring data.....	164
<i>V. Yu. Okorenkov.</i> Optimal control of the state of meteorological measurement instrumentation base	185

<i>V. Yu. Okorenkov.</i> The metrological reliability of meteorological information-measurement systems	194
<i>A. A. Kokhanovsky.</i> Spatial distribution of crystal sizes at the top of a hurricane	213
<i>G. G. Shchukin, [V. D. Stepanenko], A. V. Snegurov.</i> Advanced tendencies of radar observations on atmosphere.....	223
<i>A. P. Doronin, M. U. Belevich, V. N. Kozlov, E. E. Kilchanskiy, R. V. Sheremyetiev.</i> Research into the condition of air-mass frontal layered cloudiness above the North-West Region of Russia in respect to the problem of active modifications of clouds	242
<i>V. I. Privalov, N. N. Paramonova.</i> Gas chromatographic system for the analyses of hydrogen in the atmosphere	266
<i>I. V. Grishenko.</i> Severe frosts on the territory of the Archangelsk and Nenecky region.....	276
Nina Vladimirovna Kobysheva	285
Emma Yurievna Bezuglaya	287
In memory L.V. Ruhovets.....	290

УДК 551.58:551.509.3

**К ВОПРОСУ О ПРЕДОТВРАЩЕНИИ ГЛОБАЛЬНОГО
ПОТЕПЛЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ РАССЕЙВАНИЯ
СУЛЬФАТНОГО АЭРОЗОЛЯ В СТРАТОСФЕРЕ**

В. П. Мелешко, В. М. Катцов, И. Л. Кароль

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
meleshko@main.mgo.rssi.ru, director@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 12.03.2010

1. Введение

Во всем мире растет озабоченность глобальным потеплением климата и возможным опасным его влиянием на природную среду. Убедительным показателем этой озабоченности служат многочисленные международные научные конференции и межправительственные форумы разного уровня, на которых широко обсуждаются вопросы антропогенного потепления и его влияния на экономику и социальное развитие мирового сообщества. Важнейшей темой этих обсуждений являются меры по адаптации к изменениям климата и смягчению его пагубного влияния на устойчивое развитие человечества.

Данные измерений на сети метеорологических станций показывают, что среднее повышение глобальной температуры приземного воздуха за 100 лет (1906—2005 гг.) составило 0,74 °С, а среднее потепление на всей территории России достигло 1,33 °С за период 1976—2006 гг. (Оценочный доклад, 2008). Результаты совместного анализа данных наблюдений и расчетов с помощью сложных физико-математических моделей климата дают согласованную картину глобального потепления, и на этом основании в докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) отмечается следующее (Climate Change 2007).

• Крайне маловероятно, что наблюдаемое глобальное потепление за последние несколько десятков лет происходило без внешнего воздействия на климатическую систему.

• С высокой степенью вероятности можно утверждать, что наблюдаемое увеличение концентрации антропогенных парниковых газов обуславливает большую часть глобального потепления, наблюдавшегося во второй половине XX века.

Основной вклад в глобальное потепление вносит двуокись углерода (CO_2) путем создания парникового эффекта в атмосфере. Его радиационное воздействие на климатическую систему составляет 55 % по отношению к суммарному воздействию всех вместе взятых парниковых газов. Данные измерений на сети фоновых станций показывают, что концентрация CO_2 в атмосфере по сравнению с доиндустриальным периодом увеличилась на 38 % и составила 385 млн^{-1} в 2008 г.¹ Такой высокий уровень концентрации этого газа не наблюдался, по крайней мере, последние 650 тыс. лет.

Согласно докладу МГЭИК (Climate Change 2007), в результате хозяйственной деятельности ежегодно в атмосферу Земли выбрасывается 27 млрд т двуокиси углерода. При этом из общего количества CO_2 , поступающего в атмосферу, 30 % поглощается Мировым океаном, 13 % — биосферой и почвой континентов и 57 % остается в атмосфере. Вследствие ограниченной скорости естественного поглощения CO_2 океанами и биосферой значительная доля этого газа будет оставаться в атмосфере в течение сотен лет, способствуя тем самым дальнейшему глобальному потеплению. По некоторым оценкам, с начала индустриальной эпохи в атмосфере уже накопилось примерно 770 млрд т антропогенного CO_2 .

Первой попыткой уменьшить скорость потепления климата явилось принятие в 1998 г. Киотского протокола, согласно которому, большинство развитых стран и стран с переходной экономикой взяли на себя обязательства сократить или стабилизировать совокупный средний уровень выбросов шести типов наиболее значимых парниковых газов² на 5,2 % за период 2008—

¹ Концентрацию углекислого газа в атмосфере принято измерять количеством его частиц в объеме, содержащем миллион частиц воздуха (млн^{-1}).

² К наиболее значимым парниковым газам относятся двуокись углерода (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O), гидрофлуоруглеводороды, перфторуглеводороды, гексафторид серы (SF_6).

2012 гг. по сравнению с 1990 г.¹ При этом развивающиеся страны, включая Китай и Индию, в рамках этого соглашения никаких обязательств на себя не брали. Однако вскоре стало ясно, что такое сокращение выбросов явно недостаточно для стабилизации потепления климата, даже если бы оно строго выполнялось всеми странами, подписавшими соглашение. Более того, общие выбросы CO₂ по всем странам за период 1990—2007 гг. увеличились на 34 % при среднем за год приросте выбросов за 2006—2007 гг., равном примерно 3 % в год.²

В настоящее время стало достаточно очевидно, что глобальное потепление будет продолжаться на протяжении всего XXI века при любых известных сценариях антропогенных выбросов парниковых газов. Согласно расчетам с помощью глобальных физико-математических моделей климата, выполненным для трех сценариев роста содержания парниковых газов в атмосфере (B1, A1B, A2) в XXI веке, к концу века глобальная температура приземного воздуха повысится на 2,1—3,5 °C (Оценочный доклад, 2008).

На основе комплексного анализа научных, политических и экономических свидетельств международными группами экспертов разного уровня был рекомендован пороговый уровень глобального повышения приземной температуры воздуха по отношению к доиндустриального периода, равный 2 °C, выше которого возможны опасные антропогенные последствия в природных экосистемах и может быть причинен серьезный ущерб экономикам ряда регионов земного шара (Frieler et al., 2009). Так, согласно работе Stern (2006), под угрозой исчезновения могут оказаться 15—40 % видов экосистем; на 20—30 % сократятся водные ресурсы в густонаселенных регионах земного шара (Африка, Средиземноморье); на 5—10 % уменьшатся урожаи сельскохо-

¹ Странами с наибольшими выбросами CO₂ в 1990 г. (доля (%) по отношению к выбросам всех стран мира) стали США (36,1 %), Россия (17,4 %), Япония (8,5 %), Германия (7,4 %), Великобритания (4,3 %).

² За период 1990—2007 гг. выбросы двуокси углерода увеличились на 19 % в США, примерно в 2,5 раза в Китае, более чем утроились в Индии. Из-за общего спада промышленного производства в этот период в России выбросы сократились на 26 %, но в последние годы начался их заметный рост.

зайственных культур в некоторых тропических регионах; до 10 млн человек, проживающих в прибрежных зонах, ежегодно будут подвергаться риску наводнений; начнется необратимое таяние гренландского ледникового щита и произойдет ускоренное повышение уровня океана; увеличится риск значительных изменений циркуляции атмосферы и интенсивности муссонов.

В связи с приближением сроков окончания соглашения по Киотскому протоколу (2012 г.) и разработкой нового соглашения по ограничению выбросов парниковых газов вопрос о новых обязательствах стоит на повестке дня достаточно остро. По некоторым оценкам, для стабилизации роста концентрации CO_2 в атмосфере к 2050 г. потребуется сократить глобальную эмиссию этого газа, по меньшей мере, на 50 % по отношению к уровню 1990 г. и еще больше в дальнейшем (Geoengineering..., 2009). Поскольку усилия мирового сообщества по сокращению эмиссий парниковых газов до сих пор не были достаточно успешными, это способствовало росту интереса к различным технологиям преднамеренного воздействия на глобальный климат в качестве альтернативы указанному сокращению антропогенных выбросов.¹ В числе прочих часто упоминается глобальное рассеивание сульфатного аэрозоля в стратосфере с целью увеличения планетарного альbedo и создания тем самым глобального охлаждающего эффекта в нижней части атмосферы и на поверхности Земли. Одним из первых такую идею высказал академик М. И. Будыко в начале 1970-х годов. При этом он подчеркивал, что «применение изложенного метода воздействий на климат будет возможно только после точного предвычисления влияния такого воздействия на атмосферные процессы во всех районах земного шара» (Будыко, 1974). На протяжении последних десятилетий отдельные зарубежные ученые периодически возвращались к этому вопросу. Обстоятельный анализ различных позиций по поводу целесообразности регули-

¹ В англоязычной литературе используется термин “geoengineering”, под которым обычно понимают воздействие преднамеренного характера на климат или на концентрацию парниковых газов с целью уменьшения антропогенного потепления, вызванного ростом содержания этих газов в атмосфере.

рования глобального климата дан в ряде обзорных работ (см., например, Orr et al. (2005), Schneider (2009)).

Заслуживает упоминания обсуждение вопросов антропогенного потепления климата, проходившее в рамках Совета-семинара РАН (Возможности..., 2006). В его решениях отмечалось, что для достижения основной цели Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК), направленной на стабилизацию концентрации парниковых газов в атмосфере на уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему, потребуются большие материальные ресурсы в течение длительного времени. Основываясь на этих и других выводах Совета-семинара РАН, академик Ю. А. Израэль предложил начать разработку технологии, направленной на стабилизацию глобального потепления путем рассеивания аэрозоля в стратосфере «без необходимости регулирования концентрации парниковых газов в атмосфере. <...> метод сдерживания потепления или регулирования климата не представляет опасности для планеты и всего живого, населяющего ее» (Израэль, 2005).

За рубежом дискуссия в научном сообществе по поводу стабилизации глобального потепления активизировалась в связи с публикацией П. Дж. Крутцена (Crutzen, 2007), лауреата Нобелевской премии в области химии озона. В своей работе он выразил мнение о том, что применение преднамеренного аэрозольного распыления в стратосфере возможно как крайняя мера в случае возникновения катастрофических последствий, вызванных значительным (например, на 5 °С) потеплением глобального климата в этом столетии. Однако, по его мнению, реализация такой идеи должна быть глубоко и всесторонне изучена и продумана, прежде чем предпринимать какие-то конкретные действия. В ответ на это заявление ряд известных ученых выразили озабоченность по поводу самой идеи намеренного воздействия на окружающую среду, тем более в глобальных масштабах. По их мнению, для решения проблемы глобального потепления климата усилия, в первую очередь, следует направить на устранение причин, вызывающих это потепление, а не на борьбу с его симптомом.

В некоторых российских публикациях преднамеренное воздействие на глобальный климат рассматривается как наиболее

эффективный и вполне безопасный способ решения проблемы глобального потепления. При этом особый упор делается на относительно низкую стоимость проекта, а многие спорные вопросы и негативные последствия, связанные с применением такой технологии, не обсуждаются вовсе.

Цель настоящей работы — восполнить пробел в освещении этого вопроса в отечественной литературе и дать более полную картину состояния проблемы на основании результатов современных исследований и обсуждений на различных международных форумах.

2. Изменения климата, связанные с преднамеренным рассеиванием аэрозоля в стратосфере

В последние годы появляется все больше публикаций, посвященных изучению реакции климатической системы на воздействие посредством аэрозольного слоя в стратосфере. Эти исследования основаны на широком применении глобальных и региональных физико-математических моделей, в которых учитываются основные климатообразующие процессы, протекающие в атмосфере, океане и деятельном слое почвы на континентах (Елисеев, Мохов, 2009; Мелешко и др., 2008; Bala et al., 2008; Govindasamy, Calderia, 2000; Rasch et al., 2008 и др.). Такие модели являются незаменимым инструментом для изучения эволюции климатической системы. Важное достоинство модельных исследований — возможность, используя большие серии расчетов, выделять влияние внешнего воздействия на климатическую систему, даже если реакция системы оказывается малой по отношению к ее собственной изменчивости.

Как известно, механизмы радиационного воздействия на климатическую систему парниковых газов и аэрозоля принципиально различны. Рост атмосферной концентрации парниковых газов практически не оказывает влияния на приток солнечной радиации к поверхности Земли, но вызывает рост длинноволнового противоизлучения атмосферы. Рост содержания сульфатного аэрозоля, напротив, уменьшает приток солнечной радиации и слабо влияет на уходящую длинноволновую радиацию. В резуль-

тате солнечное и длинноволновое воздействия не компенсируют друг друга в отдельных регионах и в разные сезоны, хотя в целом для земного шара и в среднем за год теоретически может быть достигнута полная компенсация радиационного воздействия путем создания соответствующего аэрозольного экрана в атмосфере. Однако одновременно добиться компенсации широтного потепления и похолодания, глобальной стабилизации осадков и их регионального распределения, а также выхолаживания стратосферы выше аэрозольного слоя и изменения некоторых других характеристик климата практически невозможно.

В настоящее время известно несколько типов модельных сценариев по стабилизации потепления климата путем увеличения планетарного альbedo системы атмосфера—поверхность Земли. Самый простой сценарий, имитирующий рассеивание аэрозоля в стратосфере, — это уменьшение потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы при потеплении равновесного климата, вызванного удвоением концентрации CO_2 в атмосфере. Так, уменьшение солнечной постоянной на 1,8 % может полностью компенсировать увеличение глобальной приземной температуры на 3 °C в результате удвоения CO_2 (Govindasamy, Calderia, 2000). В другом случае аналогичное глобальное потепление компенсировалось путем равномерного рассеивания сульфатного аэрозоля в глобальной стратосфере, в результате чего уменьшалась прозрачность атмосферы для солнечной радиации (Мелешко и др., 2008).

Хотя в обоих случаях средняя глобальная температура приземного воздуха возвращалась к первоначальным значениям, полученным в соответствующих контрольных экспериментах, региональные распределения температуры оказывались отличными от контрольных. Отмечалось ее повышение в высоких широтах Северного полушария, особенно значительное зимой, и некоторое ее понижение в тропической зоне в течение всего года. При полной компенсации глобального потепления произошло заметное уменьшение глобальных осадков по отношению к их значениям в контрольном климате. Таким образом, стабилизация глобального потепления путем уменьшения приходящей на поверхность Земли солнечной радиации способствовала формированию более засушливых условий в целом на земном шаре по сравнению с условиями исходного кли-

мата. Это может привести к созданию неблагоприятных условий для водообеспечения больших регионов, особенно в тропической зоне, где проживает значительная часть населения земного шара.

В некоторых публикациях делаются ссылки на извержения вулканов, которые происходили в недавнем прошлом, с выбросами большого количества пепла и газов в атмосферу, приводившие к понижению температуры атмосферы в течение одного-двух лет. Эти эпизоды обычно трактуются как убедительные свидетельства того, что температуру глобальной атмосферы можно искусственным путем регулировать распылением аэрозоля в стратосфере. Однако данные наблюдений за наиболее крупными извержениями прошлого века (Эль Чичон в 1982 г., Пинатубо в 1991 г. и др.) показывают, что такие кратковременные воздействия на глобальную атмосферу влияют на гидрологические процессы и, скорее, должны послужить предостережением в отношении соответствующих преднамеренных воздействий.

Известный американский ученый А. Робок называет 20 причин, по которым преднамеренное воздействие на климат путем рассеивания аэрозоля в стратосфере является неразумной затеей (Robock, 2008). Так, наблюдения показывают, что обширные области с умеренными и сильными засухами возникли сразу после извержения Пинатубо, и доля площадей, охваченных засухами, была наибольшей в течение 1992 г. Более того, отрицательные аномалии осадков и речных стоков в том же году намного превосходили их естественные изменения за 55 лет наблюдений (Trenberth, Dai, 2007). Некоторое уменьшение осадков также наблюдалось в 1983 г. после извержения вулкана Эль Чичон, особенно в тропиках.

Расчеты неравновесного климата с использованием интерактивной модели переноса аэрозоля, в которых эмиссия аэрозоля проводилась в высоких широтах и в тропической зоне, показали, что аэрозоль достаточно быстро распространяется за пределы области воздействия и в обоих случаях приводит к большему понижению температуры приземного воздуха над континентами, чем над океанами, с последующим ослаблением муссонной циркуляции и уменьшением осадков в низких широтах (Robock et al., 2008). Причем если в тропиках время пребывания (уменьшение

концентрации в e раз) стратосферного аэрозоля составляет 12 месяцев, то в высоких широтах — только 2—4 месяца. Это исследование не подтверждает гипотезу, согласно которой, для уменьшения скорости таяния морского льда в Арктике и ледников Гренландии достаточно производить рассеивание аэрозоля только в Арктике.

3. Изменения стратосферного озона, связанные с преднамеренным рассеиванием аэрозоля

Воздействие сульфатного аэрозоля на атмосферный озон изучено недостаточно. Возможны разные пути и механизмы такого воздействия. Первый состоит в том, что под воздействием ультрафиолетовой радиации Солнца происходит образование в атмосфере озона, и этот процесс тем продуктивнее, чем больше (выше) интенсивность радиации. При эмиссии дополнительной массы сульфатного аэрозоля оптическая толщина атмосферы увеличивается, количество солнечной энергии, достигающей нижней и средней атмосферы, сокращается, и при этом уменьшается и количество образующегося там озона. Механизм «фотохимический» обусловлен разрушением озона в гетерогенных химических реакциях (на поверхности сульфатного аэрозоля и частиц полярных стратосферных облаков) с участием окислов азота и соединений хлора при очень низких температурах, имеющих место зимой. Поэтому наибольшего уменьшения содержания озона также следует ожидать над Арктикой и Антарктикой.

Для корректной оценки степени влияния дополнительной эмиссии сульфатного аэрозоля на атмосферный озон необходимы исследования с трехмерной интерактивной моделью атмосферы, учитывающей радиационные, фотохимические и динамические процессы и их взаимодействие. В указанных выше работах при разных интенсивностях выбросов аэрозолей в результате извержения Пинатубо получены оценки изменений общего содержания озона и его концентрации на разных уровнях и в разных зонах атмосферы. При этом в зависимости от метеорологических условий (холодные зимы, определяющие образование полярных стратосферных облаков) максимальные потери общего содержания озона (ОСО) в Арктике могут достигать почти 100 е. Д. (ха-

ракетное общее содержание арктического озона зимой составляет 300—400 е. Д.)¹. В Антарктике уменьшение ОСО несколько меньше, но возможна существенная задержка сроков восстановления «озонной дыры», наблюдаемой в августе—ноябре с 1980-х годов. Такое глобальное уменьшение ОСО приведет к увеличению потока биологически опасного ультрафиолетового излучения Солнца, экранируемого озоном и регистрируемого ныне в Антарктике под «озонной дырой». Рекордно низкое глобальное ОСО за всю историю его измерений наблюдалось в 1992—1993 гг. после извержения вулкана Пинатубо.

4. Окисление океана, связанное с поглощением двуокиси углерода из атмосферы

Уменьшение глобального потепления путем рассеивания аэрозоля в стратосфере не предотвращает роста концентрации CO_2 в атмосфере и соответственно роста поглощения CO_2 океаном. В результате увеличения содержания CO_2 в морской воде образуется угольная кислота и нарушается установившийся в течение миллионов лет кислотно-щелочной баланс. Это явление, получившее название «окисление океана», приводит к уменьшению pH воды и снижению содержания в ней карбоната кальция, необходимого для существования многих морских организмов (Frieler et al., 2009).

С начала индустриального периода щелочность верхнего слоя океана уменьшилась на 0,1 pH, что соответствует повышению его кислотности примерно на 30 %. Ожидается дальнейшее уменьшение щелочности на 0,3—0,4 pH, если концентрация CO_2 в атмосфере достигнет уровня 750 млн^{-1} к концу XXI века (сценарий A1B) (Orr et al., 2005).

¹ В качестве единицы измерения общего содержания озона (ОСО) принята так называемая единица Добсона, которая соответствует толщине озонового слоя, приведенного к нормальному давлению 760 мм рт. ст. и температуре воздуха 0 °С. Единица Добсона (е. Д.) соответствует 0,01 мм толщины этого слоя. В средних широтах Северного полушария наибольшее значение ОСО (до 500—700 е. Д.) наблюдается весной, наименьшее (около 300 е. Д.) — осенью.

Многочисленные исследования указывают на ряд негативных последствий окисления океана для морской биоты, что вызывает серьезную озабоченность в научном сообществе (Doney et al., 2009; Orr et al., 2005). Дело в том, что кислотность океана изменяется во много раз быстрее, чем это происходило за последние несколько десятков миллионов лет. В настоящее время неясно, смогут ли живые организмы и экосистемы океана приспособиться к таким изменениям. В наибольшей степени повышение кислотности сказывается на морских организмах, раковины и скелеты которых состоят из карбоната кальция, и в частности на кораллах, известковом планктоне, мидиях, улитках, морских ежах. Существуют опасения, что к середине текущего столетия скорость эрозии коралловых рифов превысит скорость их формирования.

Повышение кислотности может повлиять на морские пищевые системы и привести к значительным изменениям в промысловых запасах рыбы, создавая угрозу как продовольственной безопасности миллионов людей, так и промышленности (Orr et al., 2005).

Для предотвращения угрозы окисления океанской среды требуется уменьшить выбросы CO_2 в атмосферу. В настоящее время осуществляется ряд проектов, целью которых является выяснение вопроса, можно ли вызвать более активное поглощение CO_2 из атмосферы путем искусственного обогащения океана соединениями, содержащими железо. С другой стороны, представляется нереальной попытка с помощью химических средств и инженерных методов повернуть вспять процесс повышения кислотности в масштабах Мирового океана. Эффективность подобной технологии еще не доказана, и существует высокая вероятность того, что ее применение может привести к пагубным экологическим последствиям с непредсказуемыми рисками для морских экосистем (Geoengineering..., 2009).

5. Некоторые другие аспекты проблемы преднамеренного распыления аэрозоля в стратосфере

Климат является нелинейной системой, включающей атмосферу, гидросферу, криосферу, деятельный слой суши и биосферу, которые сложным образом взаимодействуют между собой.

Помимо внутренних взаимодействий между указанными компонентами, эволюцию климатической системы определяют внешние воздействия (колебания солнечного излучения, извержения вулканов и др.). Характерное время реакции различных компонентов климатической системы на внешние воздействия различается в несколько раз.

Реакция климатической системы на преднамеренное рассеивание аэрозоля в стратосфере намного сложнее, чем простое восстановление энергетического баланса между нагреванием, вызванным ростом содержания парниковых газов, и охлаждением под воздействием сульфатного аэрозоля. Климатическая система подвержена значительной внутренней (не связанной с внешними воздействиями) изменчивости. Во внетропических широтах внутренние колебания атмосферы и океана являются доминирующими. Существуют веские основания считать, что изменения климата в XX веке были связаны с собственными колебаниями климатической системы, на которые накладывался слабый тренд потепления, вызванный ростом содержания парниковых газов в атмосфере (Bengtsson, 2006).

Примером того, насколько значительными могут быть естественные колебания климата регионального масштаба, служат колебания уровня Каспийского моря. Как известно, в 30—70-х годах прошлого столетия уровень моря непрерывно снижался, в результате чего был причинен большой ущерб экономике и экологии в этом регионе. Большинство ученых-гидрологов предсказывали дальнейшее понижение уровня моря вследствие сокращения стока рек из-за безвозвратных его потерь на заполнение водохранилищ, испарение с поверхности искусственных водоемов, водозабора на орошение и др. На этом основании в течение нескольких десятилетий строились различные концепции по регулированию водохозяйственного использования Волги и обсуждалась необходимость переброски в ее бассейн части стока северных рек. Для уменьшения испарения разрабатывались планы по отсечению с помощью дамб мелководных акваторий в восточной части Северного Каспия и перекрытия пролива, соединяющего Каспий с заливом Кара-Богаз-Гол, и др.

Однако Каспий сыграл с учеными злую шутку: уровень моря, вместо того чтобы продолжать понижаться, с 1978 г. неожиданно

стал быстро повышаться. Это привело к еще большим негативным последствиям в регионе. Из указанных мер было осуществлено лишь перекрытие пролива глухой дамбой в начале 1980 г., когда уровень моря уже стал повышаться, а в 1984 г. часть стока в залив стали подавать через временное водопропускное сооружение. В середине 1992 г. плотина была взорвана, и сток вод Каспия через пролив в Кара-Богаз-Гол был вновь восстановлен. Эти колебания уровня моря отражают естественные многолетние климатические колебания на большой территории водосбора в результате изменений общей циркуляции и влагооборота атмосферы Северного полушария.

Другим примером значительных межгодовых колебаний климата служит чрезвычайно холодная зима 2007/08 г. в Азии (Центральная Азия, Китай, Индия, Индокитай, Саудовская Аравия), в результате которой был причинен значительный ущерб хозяйственной деятельности и социальным структурам огромного региона.

В течение нескольких десятилетий антропогенное потепление может в значительной степени маскироваться внутренней изменчивостью климата во многих регионах земного шара. Насколько значимые изменения климата повлечет за собой преднамеренное аэрозольное воздействие, можно будет установить с необходимой степенью достоверности на основании данных наблюдений лишь через несколько десятилетий. В связи с этим, начиная глобальное преднамеренное воздействие на климатическую систему, мировому сообществу следует заранее осознать, что заслуживающие доверия выводы о последствиях регулирования климата можно будет получить только после осуществления глобальной по масштабу и беспрецедентной по продолжительности международной программы. Климатический полевой эксперимент меньшей продолжительности, по-видимому, не имеет смысла, поскольку статистика данных наблюдений может оказаться недостаточной для окончательных выводов относительно последствий преднамеренного воздействия.

Расчеты с использованием современных моделей климата показывают, что глобальное потепление можно полностью предотвратить в течение короткого периода времени путем распыления сульфатного аэрозоля в стратосфере. Для поддержания средней глобальной температуры приземного воздуха на приемлемом

уровне выбросы аэрозоля в стратосферу необходимо осуществлять регулярно в возрастающих количествах в течение неопределенно длительного времени (возможно, нескольких сотен лет) из-за возрастающего содержания парниковых газов. Однако возврат глобальной температуры воздуха к заданному (исходному) состоянию не обеспечивает сохранения региональных особенностей климата.

Согласно модельным расчетам, для компенсации глобального потепления, вызванного удвоением концентрации парниковых газов в атмосфере, требуется уменьшить солнечную постоянную на 1,8 % или путем рассеивания аэрозоля в стратосфере уменьшить прозрачность атмосферы. Это означает, что при безоблачных условиях и нормальной прозрачности атмосферы в регионах, имеющих наибольший теоретический потенциал солнечной энергии, полный радиационный поток на поверхности Земли может быть на 20 Вт/м^2 меньше, а прямая солнечная радиация уменьшится на $70\text{—}100 \text{ Вт/м}^2$, что составляет не менее 10 % полного потока. Это, в свою очередь, может оказать заметное влияние на работу параболических и параболоцилиндрических концентраторов, использующих прямую солнечную радиацию для генерации тепловой и электрической энергии. Данные наблюдений показывают, что вскоре после извержения вулканов Эль Чичон и Пинатубо прямая солнечная радиация у поверхности Земли уменьшилась на 25—35 % (Robock, 2008). Как известно, в настоящее время солнечная энергетика, являясь одним из важнейших возобновляемых источников энергии, находится в стадии бурного развития, и сокращение ее возможностей в результате постоянного поддержания аэрозольного слоя в атмосфере может стать серьезным препятствием на пути ее эффективного применения в хозяйственной деятельности.

Непрерывное поддержание заданной концентрации аэрозоля в стратосфере создаст во всем мире очевидные проблемы для астрономических обсерваторий, оптические приборы которых располагаются в районах и на высотах, где атмосферный воздух наименее подвержен загрязнению.

Продолжительность осуществления проекта по рассеиванию аэрозоля диктуется продолжительностью пребывания в атмосфере CO_2 . Попав однажды в стратосферу, этот газ может находиться в

ней в течение нескольких сотен лет (Climate Change, 2007). Начав рассеивание аэрозоля в стратосфере в какой-то момент, остановить его по каким-либо причинам (техническим, экономическим, политическим или при обнаружении непредвиденных негативных последствий) будет далеко не просто вследствие сложности быстрой адаптации к новому, еще более значительному и резкому потеплению климата, чем это было в прошлом. Другими словами, однажды начав программу по стабилизации глобального климата, мировое сообщество неявно берет на себя обязательство по ее продолжению в течение нескольких сотен лет — до тех пор пока несколько сотен миллиардов тонн двуокиси углерода не будут удалены из атмосферы путем естественного поглощения океаном и биосферой.

Изменения климата в различных регионах земного шара по масштабам последствий могут быть самыми разнообразными. Если в одних регионах глобальное потепление может вызвать крайне негативные последствия, то в других, наоборот, могут появиться новые благоприятные возможности. Более того, если климат можно регулировать, то возникает вопрос, какой климат должен быть оптимальным. Вопрос этот очень непростой, поскольку для разных стран и целых регионов понятие «оптимальный климат» может быть далеко не одинаковым. В этих условиях кто-то должен будет принимать непростые решения, когда и как нужно начинать действовать.

Проект таит в себе опасность возникновения новых международных осложнений, поскольку преднамеренное воздействие на климат может привести к конфликтам между отдельными странами или группами стран. Любые погодные катаклизмы (тайфуны, наводнения, засухи), которые могут возникнуть во время осуществления проекта, будут служить вполне оправданным поводом для пострадавших утверждать, что причиненный ущерб связан именно с этим проектом, и требовать соответствующей компенсации. Другими словами, потенциальные возможности для конфликтов могут создать серьезные политические проблемы независимо от того, насколько технически и экономически эффективными окажутся в конечном итоге преднамеренные воздействия на климат.

Иногда говорят, что эмиссия аэрозоля в стратосфере — это самый дешевый способ борьбы с потеплением, но при этом замалчивается вопрос о том, во сколько обойдутся пагубные последствия применения такой технологии для климата и природной среды в долговременной перспективе. О некоторых из таких последствий мы уже сейчас кое-что знаем, но о многих других еще предстоит узнать в результате исследований. С другой стороны, известно, что при значительной стоимости программы по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу затраты на преодоление связанных с ней последствий климатических изменений будут определено минимальными.

6. Выводы

Глобальное потепление является результатом *непреднамеренного* воздействия на климат хозяйственной деятельности человека. Мировое сообщество выбрасывает в атмосферу двуокись углерода и другие парниковые газы для того, чтобы создать комфортные условия для своего существования. Настало время, когда сообщество должно в полной мере осознать, какое влияние эта деятельность оказывает на климат и экосистемы, и, наконец, ответить на вопрос, имеем ли мы моральное право продолжать выбрасывать в атмосферу парниковые газы и наносить вред природной среде, не задумываясь о последствиях. В настоящее время не существует каких-либо моральных ограничений на этот счет, но возникает вопрос, как далеко человечество может зайти в манипулировании природой?

Если не удастся добиться существенного снижения выбросов CO_2 в атмосферу в ближайшие десятилетия и уменьшить глобальное изменение климата, то уже в нынешнем столетии страны столкнутся с серьезными проблемами адаптации к новым климатическим условиям, которые могут быть чрезвычайно неблагоприятными для экономического развития и политической стабильности в отдельных регионах земного шара.

В большинстве своем члены научного сообщества в мире высказывают глубокую озабоченность возможным применением в широ-

ких масштабах преднамеренных воздействий на климатическую систему. Существует широко распространенное мнение о том, что деятельность по применению таких технологий всегда будет сопровождаться сомнительной эффективностью и большими рисками.

Ярким примером недостаточно продуманного вмешательства человека в природную среду с целью ее более эффективного хозяйственного использования служит печальная судьба Аральского моря. Серьезные социальные и экономические последствия этого вмешательства прямо или косвенно затронули все страны Средней Азии. В середине прошлого века этот замкнутый водоем славился богатейшими природными запасами, а зона Приаралья считалась процветающей. Однако во второй половине XX века в этом регионе стали интенсивно разрабатываться и воплощаться в жизнь планы по комплексному освоению водных и земельных ресурсов. Экономика этого региона в те годы была ориентирована на развитие ирригационного сельского хозяйства и рост объемов безвозвратного водопотребления для орошения.

Осознанное изъятие из притоков Аральского моря воды в больших объемах привело к гибели этого крупнейшего водоема. Когда-то реки Амударья и Сырдарья доставляли в Аральское море 60 км^3 воды в год. Ныне сток с Амударьи полностью прекратился, и лишь поддерживается очень незначительный сток Сырдарьи. В результате на месте когда-то четвертого по величине озера в мире образовалось несколько мелких обособленных водоемов. При этом только 50—60 % изъятной воды доходит до орошаемых полей. Из-за неправильного и неэкономичного распределения воды происходит заболачивание отдельных районов орошаемых земель, что делает их непригодными для сельскохозяйственного производства. Повсеместное расширение площадей под орошение хлопковых плантаций в долинах рек Сырдарьи и Амударьи сопровождалось не только изъятием воды, нарушением гидрологического режима рек и засолением плодородных земель, но также внесением в окружающую среду огромного количества химических веществ. Исчезновение Аральского моря привело к образованию громадных солончаковых пустошей, ставших поставщиками солей и пыли в атмосферу.

Ранее Арал выступал в роли своеобразного регулятора климатических условий, смягчая холодные зимы и жаркие летние месяцы. Усыхание Арала привело к резким изменениям климатических условий всего региона в целом. Сейчас заметно усиление резко континентального климата. Лето в Приаралье стало более сухим и коротким, а зима — более холодной и длинной. По мнению специалистов, спасти Аральское море уже невозможно. Даже если полностью отказаться от забора воды из рек Амударьи и Сырдарьи, то прежний уровень воды в озере восстановится не ранее чем через 200 лет.

Нельзя сказать, что эта экологическая катастрофа в масштабах достаточно крупного региона планировалась изначально и намеренно. Наоборот, перспективы развития Среднеазиатского региона рассматривались как чрезвычайно многообещающие. Согласно сводной программе комплексного освоения и использования водных и земельных ресурсов Средней Азии, предусматривалась переброска части стока сибирских рек в нижнее течение рек Амударьи и Сырдарьи. Однако в 1986 г. все работы по каналу Сибирь — Средняя Азия были прекращены по экологическим и экономическим соображениям Правительством СССР, а осуществление планов по изъятию воды из рек Амударьи и Сырдарьи для нужд орошения продолжалось прежними темпами на региональном уровне управления.

Важно отметить, что вмешательство человека в климатическую систему глобального масштаба таит в себе намного больше неопределенностей и возможных серьезных последствий по сравнению с вмешательством регионального масштаба. Результаты исследования показывают, что международному сообществу необходимо с чрезвычайной осторожностью относиться к вмешательству в климатическую систему путем преднамеренного воздействия, поскольку последствия лечения от потепления могут оказаться хуже последствий самой болезни. Технологии борьбы с глобальным потеплением, которые могут привести к развитию засух и дефициту водных ресурсов в различных регионах земного шара, заслуживают серьезного внимания.

Ясно, что уменьшение потепления климата путем рассеивания в стратосфере аэрозоля не может предотвратить всех негативных последствий, связанных с ростом концентрации CO_2 в атмосфере.

Многие ученые полагают, что активизация деятельности по преднамеренному воздействию на климат отвлекает внимание правительств от решения более насущной проблемы — увеличения энергоэффективности экономики и сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу, а также способствует сокращению фондов, необходимых для решения более важных климатических задач, дальнейшему развитию и внедрению новых технологий по возобновляемым источникам энергии. Наиболее очевидный путь решения проблемы глобального потепления состоит в том, чтобы направить усилия мирового сообщества на развитие альтернативных источников энергии (солнечной, ветровой, гидроэнергетики, атомной и др.) и на уменьшение доли углеродных источников в мировом энергетическом балансе с одновременным повышением эффективности их использования, а также развитием новых технологий по уменьшению выбросов двуокси углерода и других парниковых газов в атмосферу во всех отраслях хозяйственной деятельности.

С другой стороны, нельзя не признать, что противопоставить сомнительным проектам по преднамеренному воздействию на климат можно лишь научные результаты, полученные в рамках серьезных исследований и подвергнутые глубокому и тщательному анализу. Исследования по преднамеренному воздействию на климат находятся в стадии становления и проводятся с помощью сложных физико-математических моделей.

Важно также отметить, что исследования по преднамеренному воздействию на климатическую систему вряд ли следует относить к научным приоритетам России, самой холодной стране мира, для которой в потеплении климата плюсов больше, чем минусов, по крайней мере на ближайшие десятилетия. Возможный, ожидаемый и потенциально весомый вклад России в смягчение антропогенной нагрузки на климат состоит, прежде всего, в развитии энергосберегающих технологий и технологий полу-

чения энергии из возобновляемых источников, повышении эффективности энергопотребления в производственной деятельности и в быту.

Авторы выражают признательность своим коллегам Е. Л. Гениховичу и С. С. Чичерину за полезные замечания, высказанные при обсуждении рукописи, а также Л. В. Луцько за предоставленные данные по солнечной радиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Будыко М. И. (1974). Метод воздействия на климат. — Метеорология и гидрология, № 2, с. 91—97.

Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий. Проблема Киотского протокола (2006). — В сб.: Материалы Совета-семинара при Президенте РАН / Под ред. Ю. А. Израэля. — М.: Наука. — 408 с.

Елисеев А. В., Мохов И. И. (2009). Модельные оценки эффективности ослабления и предотвращения глобального потепления климата в зависимости от сценариев контролируемых аэрозольных эмиссий в стратосферу. — Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 45, № 2, с. 232—244.

Израэль Ю. А. (2005). Эффективный путь сохранения климата на современном уровне — основная цель решения климатической проблемы. — Метеорология и гидрология, № 10, с. 5—9.

Мелешко В. П., Кароль И. Л., Катцов В. М., Спорышев П. В., Булгаков К. Ю., Фролькис В. А. (2008). Реакция равновесного климата на преднамеренную эмиссию стратосферного аэрозоля, рассчитанная по глобальной модели атмосферы и верхнего слоя океана ГГО. — Труды ГГО, вып. 558, с. 41—63.

Оценочный доклад об изменении климата и его последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. (2008). — М., изд. Росгидромета. — 227 с.

Bala G., Duffy P. B. and Taylor K. E. (2008). Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. — PNAS, 105, No. 22, p. 7664—7669.

Bengtsson L. (2006). Geoengineering to confine climate change: is it at all feasible? — Climate Change, 77, p. 229—234.

Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (eds.). — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. — 996 p.

Crutzen P. J. (2006). Albedo enhancement by stratospheric sulfur injection: a contribution to resolve a policy dilemma? — Climate Change, 77, p. 211—219.

Doney S. C., Fabry V. J., Feely R. A., and Kleypas J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. — *Ann. Rev. Marine. Sci.*, 1, p. 169–192.

Frieler K., Meinshausen M., Hare B. (2009). High noon for 2 °C. — *AirClim, Environmental Fact Sheet No. 2*, Oct., p. 1–8.

Geoengineering the Climate (2009). Science, governance and uncertainty. — The Royal Society, Sept. — 82 p.

Govindasamy B., Caldeira K. (2000). Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO₂ — induced climatic change. — *Geoph. Res. Lett.*, 14, p. 2141–2144.

Orr J. C., Fabry V. J., Aumont O., Bopp L., Doney S. C., Feely R. A., Gnanadesikan A., Gruber N., Ishida A., Joos F., Key R. M., Lindsay K., Maier-Reimer E., Matear R., Monfray P., Mouchet A., Najjar R. G., Plattner G.-K., Rodgers K. B., Sabine C. L., Sarmiento J. L., Schlitzer R., Slater R. D., Totterdell I. J., Weirig M.-F., Yamanaka Y. and Yool A. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. — *Nature*, 437, Doi:10.1038/nature04095.

Rasch P. J., Tilmes S., Turco R. P., Robock A., Oman L., Chen C.-C., Stenchikov G., and Garcia R. (2008). An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. — *Phil. Trans. R. Soc.*, 366, p. 4007–4037 doi: 10.1098/rsta.2008.0131.

Robock A. (2008). 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. — *Bull. Atomic Sci.*, 64, No. 2, p. 14–18.

Robock A., Oman L., and Stenchikov G. L. (2008). Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injection. — *J. Geophys. Res.*, 113, D16101, doi: 10.1029/2008JD010050.

Schneider S. H. Geoengineering: could we or should we make it work? (2009). — *Phil. Trans. R. Soc.*, A2008 366, 3843–3862, doi: 10.1098/rsta.2008.0146.

Stern N. (2006). The economics of climate change: The Stern Review, Cabinet Office — HM Treasury, UK. — 579 p.

Trenberth K. E. and Dai A. (2007). Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as analog of Geoengineering. — *Geophys. Res. Lett.*, 34, L15702, doi:10.1029/2007GL030524.

УДК 551.581, 551.583

О КОМПЛЕКСИРОВАНИИ АНСАМБЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Е. Л. Генихович, Т. В. Павлова, В. М. Катцов

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

Поступила в редакцию 1.02.2010

1. Введение

Современные физико-математические модели климата представляют собой важный инструмент для расчетной оценки его возможных изменений. Эффективность этих моделей определяется путем их использования в режиме диагноза или «ретроспективного прогноза» наблюдавшихся в прошлом условий климата, что само по себе представляет достаточно сложную задачу, в частности, в связи с ограниченной точностью используемых моделей, вызванной в том числе недостаточностью параметризаций физических процессов, учитываемых в моделях, сложностью корректного задания форсинга, неполнотой описания соответствующих обратных связей и другими факторами. При попытке же использования этих моделей в режиме прогноза возникают дополнительные источники погрешностей, связанные, в частности, с недостаточной определенностью прогнозов будущих антропогенных и естественных воздействий на климатическую систему. Этими обстоятельствами, в том числе, объясняется тот факт, что в публикациях, посвященных моделированию возможных изменений климата, вместо термина «прогноз» (prediction) при описании получаемых оценок обычно используется термин, перевод которого на русский язык несколько громоздок: «оценка возможных в будущем состояний» или «условный прогноз» (projection). Для нижеследующего обсуждения это различие не является

принципиальным, поэтому для краткости будет использоваться термин «прогноз».

Валидация моделей климата и, в более широком смысле, любое сопоставление модельных предсказаний с натурными данными представляют серьезную проблему в связи с «высокой зашумленностью» атмосферных процессов, которая проявляется в их «случайных изменениях» в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. Поворотным пунктом в понимании природы указанных изменений стала публикация статьи Эдуарда Лоренца (Lorenz, 1963a), где было введено понятие хаоса как свойства высокой чувствительности решения детерминированной динамической (обычно нелинейной) системы к малым возмущениям начальных или граничных условий, характеристик протекающих в системе физических процессов и пр. Такая система может быть «настолько хаотичной», что на практике она воспринимается как ведущая себя случайным образом и соответственно имеющая ограничения на предсказуемость ее поведения. Данное утверждение относится не только к климатической системе нашей планеты, но и к математическим моделям климата, если они более или менее адекватно описывают процессы, протекающие в окружающей среде.

С учетом высокой зашумленности модельных прогнозов их использование при детерминистических оценках изменения климата, полученных с определенной конкретной моделью, может оказаться неэффективным. В рамках математической теории климата (см., например, Дымников, Грицун, 2000) для описания состояния и динамики климата Земли предлагается использовать аттрактор, т. е. притягивающее множество в фазовом пространстве динамического оператора климатической системы (см., например, Eckmann, Ruelle, 1985). Если климатический аттрактор построен и на нем задана вероятностная мера, то, в принципе, это позволяет получить статистически устойчивые характеристики современного климата и динамики его изменения, например соответствующие математические ожидания средней глобальной температуры воздуха вблизи подстилающей поверхности. К сожалению, конструктивные результаты по построению для достаточно реалистичной модели климата Земли соответствующего аттрактора и заданной

на нем зависящей от времени вероятностной меры до настоящего времени не получены. Неясным также остается вопрос об информативности получаемых математических ожиданий для тех климатических переменных, которым соответствуют «большие стандартные отклонения» (см. последующую дискуссию).

В качестве альтернативы при моделировании климата широко используется введенное Лоренцем в метеорологическую практику «ансамблевое моделирование» (Lorenz, 1963a, b; Kalnay, 2003; Tebaldi, Knutti, 2007; Катцов, Мелешко, 2008). Оно основано на идее «расширения» возможностей применения детерминистических по своей сути моделей для описания хаотических систем за счет привлечения аппарата теории стохастического моделирования (Lorenz, 1965, 1968; Epstein, 1969; Leith, 1974). При этом стохастичность может «достигаться», например, за счет генерации с помощью одной детерминистической модели «набора» (ансамбля) решений, различающихся за счет учета возможных случайных различий в задании в этой модели начальных и граничных условий, параметризации физических процессов и пр. В настоящее время при оценке возможных изменений климата широко используются ансамбли, включающие совокупность различных детерминистических моделей климата, каждая из которых вносит в описание климатической системы «свой элемент случайности», связанный с конкретными особенностями используемых численных схем, параметризаций физических процессов, способов задания условий на подстилающей поверхности и пр. Соответствующие многомодельные (в англоязычной литературе “multimodel”) ансамбли применяются в работах, выполненных как за рубежом, так и в России (Meehl et al., 2007; Мелешко и др., 2008).

В оправдание применения многомодельных ансамблей обычно ссылаются на эмпирический факт более близкого соответствия историческим данным о климате Земли среднего по ансамблю значения, например, средней глобальной температуры, чем соответствующих оценок, сделанных с использованием каждой из включенных в ансамбль моделей отдельно. Такое оправдание представляется, на первый взгляд, вполне правдоподобным, поскольку оно кажется соответствующим известному из математической статистики результату о «сокращении в \sqrt{N} раз» погрешности среднего

из N случайных чисел по сравнению с «индивидуальной» погрешностью каждого из этих случайных чисел. При этом, однако, не следует упускать из виду, что данное свойство среднего выведено в предположениях о независимости указанных случайных чисел и их принадлежности к одной и той же генеральной совокупности. Легко видеть, что эти предположения в случае ансамбля климатических моделей не выполняются хотя бы потому, что между прогнозами, сделанными с помощью различных моделей, имеется достаточно тесная корреляционная зависимость.

Кроме того, имеющиеся результаты ансамблевых прогнозов указывают на значительный разброс прогнозов в многомодельном ансамбле, полученных с использованием каждой из входящих в него моделей по отдельности (Delworth, Knutson, 2000; Meehl et al., 2007; Мелешко и др., 2008; Brekke et al., 2008), т. е. на большие значения стандартных отклонений модельных прогнозов относительно ансамблевого среднего. Эмпирические данные о климате Земли (см. Met Office Hadley Centre observations datasets) и результаты их анализа (ERA-40; Forest et al., 2001; Sokolov et al., 2009a, b) также не противоречат утверждению о том, что стандартные отклонения климатических переменных нельзя считать малыми по сравнению с их математическими ожиданиями (средними значениями). В таких ситуациях, как известно, среднее значение случайной величины по рассматриваемой выборке не является «хорошим представителем» индивидуальных значений данной случайной величины, и в частности не может рассматриваться как «эффективная прогностическая оценка» этой величины.

Аналогичная ситуация высокой изменчивости рассматриваемых переменных имеет место в ряде других разделов метеорологии, включая численный прогноз погоды, теорию атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы и др. При этом, однако, оказывается возможным успешно прогнозировать требуемые характеристики, поскольку разработаны достаточно эффективные методы «преодоления» возникающих трудностей. Они основаны на динамическом усвоении данных наблюдений и использовании в прогнозе «помехоустойчивых» характеристик при его заблаговременности, не превышающей предел предсказуемости. В данной работе анализируются возможности применения в задачах

моделирования климата реализующего указанные идеи аппарата усвоения данных наблюдений и комплексирования моделей.

Вопросам оценки качества предсказаний с помощью метеорологических и климатических моделей и «ранжирования» этих моделей посвящены работы Kleeman (2002), Ehrendorfer (2005), Eshel (2006), Shukla et al. (2006), DelSole, Tippet (2007), Brekke et al. (2008), Glecker et al. (2008), Youmin Tang et al. (2005, 2007) и др. Среди публикаций, которые по своей направленности ближе всего к предлагаемой работе, можно упомянуть работы Strauss et al. (2006) и Tippet et al. (2008), хотя как общая идеология данной работы, так и использованный нами аппарат характеризуются существенными отличиями.

2. Используемые данные

Для иллюстрации возможностей развиваемой в настоящей работе методологии используется ансамбль моделей, участвующих в международном проекте CMIP3 (Meehl et al., 2007; Мелешко, 2008; Говоркова и др., 2008; Мелешко и др., 2008). Список этих моделей приведен в табл. 1 (несколько моделей были исключены из рассмотрения на основе предварительного анализа их качества или вследствие того, что расчеты по ним были начаты позже 1871 г.).

В работе использованы ряды среднегодовых глобальных температур, рассчитанные по этим моделям за период с 1871 по 2005 г. Кроме того, были использованы ряды аномалий данных характеристик по отношению к их среднему значению за базовый период 1961—1990 гг.

Модельные расчеты сопоставлялись с массивами соответствующих данных наблюдений, подготовленными в Центре Хэдли Британской метеослужбы и размещенными в Интернете (см. ссылки на Met Office Hadley Centre observations datasets в списке литературы). В аналогичных целях может также применяться информация, доступная на сайте GISS (Goddard Institute for Space Studies). К сожалению, ряды данных реанализа ERA-40 оказались недостаточно длинными для наших целей и потому в работе не использовались.

Таблица 1

**Модели общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3,
используемые в настоящей работе**

№ п/п	Модель, страна	№ п/п	Модель, страна	№ п/п	Модель, страна	№ п/п	Модель, страна
1	BCRR-BCM2.0, Норвегия	6	CSIRO-Mk3.0, Австралия	11	GISS-AOM, США	16	UKMO-HadCM3, Великобритания
2	CCSM3, США	7	ECHAM5/MPI-OM, Германия	12	INM-CM3.0, Россия	17	UKMO-HadGEM1, Великобритания
3	CGCM3.1(T47), Канада	8	ECHO-G, Германия/Корея	13	IPSL-CM4, Франция		
4	CGCM3.1(T63), Канада	9	GFDL-CM2.0, США	14	MIROC3.2, Япония		
5	CNRM-CM3, Франция	10	GFDL-CM2.1, США	15	MRI-CGCM 2.3.2, Япония		

3. Формальная постановка задачи и методология ее решения

Для упрощения изложения одним и тем же термином «модель» мы будем пользоваться при упоминании как компьютерной реализации некоего алгоритма численного решения системы уравнений, описывающих изменение во времени и пространстве климата Земли, так и ряда климатических переменных, «сгенерированного» в результате этого численного решения. Для простоты записи ограничимся также случаем одной скалярной климатической переменной, а именно среднегодовой глобальной температуры подстилающей поверхности, хотя изложение практически без изменений может быть обобщено и на случай нескольких переменных, каждая из которых, например, рассматривается отдельно. Модели рассматриваются на таком промежутке времени, для которого имеются данные как расчетов, так и наблюдений. При

этом полагается, что ряды расчетных и «наблюденных» характеристик «синхронизированы» по масштабам пространственного и временного осреднения и не имеют пропусков.

Представим модельный ансамбль в виде совокупности K векторов \mathbf{X}_i , где i — номер модели ($i = 1, 2, \dots, K$). Каждый из этих векторов имеет размерность N и представим в виде $\mathbf{X}_i = \{X_{ji}\}$, где в нашем случае j — номер года ($j = 1, 2, \dots, N$), к которому относится характеристика X_{ji} . Соответственно N -мерный вектор наблюдений \mathbf{F} представим в виде $\mathbf{F} = \{F_j\}$.

Рассмотрим задачу наилучшей аппроксимации вектора наблюдений \mathbf{F} линейной комбинацией векторов из ансамбля. Очевидно, что ее решение дает проекция \mathbf{F} на подпространство, натянутое на вектора \mathbf{X}_i , которые дополнены единичным ортом \mathbf{E} (чтобы обеспечить возможность перехода к свободным векторам). В свою очередь, такая проекция определяется из условия минимума квадрата расстояния δ^2 от \mathbf{F} до точек этого подпространства:

$$\delta^2 = \min, \quad (1)$$

где

$$\delta^2 = \sum_{j=1}^N (w_0 + \sum_{i=1}^K w_i X_{ji} - F_j)^2. \quad (2)$$

Набор весовых коэффициентов w_i ($i = 0, 1, 2, \dots, K$), соответствующих минимуму (1), позволяет определить такой вектор \mathbf{X} , который представляет собой суперпозицию векторов \mathbf{X}_i и обеспечивает наилучшую аппроксимацию \mathbf{F} в рассматриваемом ансамбле моделей:

$$\mathbf{X} = w_0 + \sum_{i=1}^K w_i \mathbf{X}_i. \quad (3)$$

Получающаяся при этом система уравнений для определения w_i формально совпадает с системой нормальных уравнений метода наименьших квадратов, так что w_i можно было бы интерпретировать как коэффициенты регрессии, если бы речь шла о разработке статистической модели. Представляется, однако, что аппарат статистики не вполне адекватен рассматриваемой

проблеме, поскольку в рядах $\{X_{ji}\}$ имеется сильно выраженная неслучайная составляющая (вообще говоря, нелинейная), которая и играет основную роль при исследовании. Следует также отметить, что в настоящее время при построении ансамблевых прогнозов обычно используется ансамблевое среднее, которое может быть вычислено по формуле (3), если задать весовые коэффициенты $w_0 = 0$ и $w_i = 1/K$.

Предвосхищая дальнейшее изложение результатов проведенных в данной работе расчетов, заметим, что непосредственное использование соотношения (3) с весовыми коэффициентами, определенными из решения задачи (1)—(2), оказалось недостаточно эффективным. Причина возникающих трудностей связана с тем, что используемая как базис система векторов $\{X_i\}$ из рассматриваемого ансамбля является неортогональной и, более того, векторы в этом базисе, вообще говоря, близки к взаимозависимым. Этого можно было ожидать, поскольку все включенные в ансамбль климатические модели с самого начала строились таким образом, чтобы обеспечить реалистичное воспроизведение наблюдавшейся динамики климата, так что построенные с их использованием векторы $\{X_i\}$ «почти параллельны» друг другу. В результате построенная для (1)—(2) матрица нормальной системы характеризуется очень большим числом обусловленности, т. е. является «почти вырожденной».

Стандартный подход к решению возникающих при этом проблем связан с использованием регуляризации. В данной работе мы для этого применили метод пошаговой оптимизации, в рамках которого задача (1)—(2) сначала решается на векторах вида (3) при условии, что отличными от нуля в выражении (3) являются только w_0 и один из коэффициентов w_i . В результате из всех полученных значений δ^2 выбирается минимальное, а также соответствующие номер $i = i_0$ и модель X_{i_0} . Далее эта же задача решается на векторах вида (3) с двумя отличными от нуля коэффициентами w_i . Этот процесс продолжается до тех пор, пока увеличение числа отличных от нуля коэффициентов w_i не перестанет приводить к значимому уменьшению расстояния δ^2 . Заметим, что аналогом данной процедуры при использовании аппарата статистики явился бы метод пошаговой регрессии.

Если определять веса w_i не по всему ряду наблюдений $\{F_j, j = \overline{1, N}\}$, а только по его «начальному отрезку» $j = \overline{1, N_1}$, то значения X_j , рассчитанные по формуле (3) при $j > N_1$, могут рассматриваться как результат «прогноза» $\{F_j\}$ для указанных j , качество которого можно оценивать путем сопоставления с соответствующими известными значениями $\{F_j\}$. Поскольку использованные в (3) весовые коэффициенты определяются по ряду $\{F_j\}$, можно говорить, что их значения получены путем усвоения данных наблюдений, а прогноз значений $\{F_j\}$ по формуле (3) интерпретировать как результат «комплексирования» включенных в ансамбль моделей.

4. Анализ результатов расчетов

Исходные ряды $\{X_i\}$ и F , а также соответствующие ряды аномалий (отклонений от средних значений указанных рядов за период с 1961 по 1990 г.) приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что модельные ряды среднегодовых глобальных температур, хотя и воспроизводят сходным образом тенденцию общего потепления, но характеризуются существенным разбросом значений, который не удается полностью устранить при переходе к рядам аномалий.

На рис. 2 а сопоставлена динамика изменения во времени фактического ряда среднегодовых глобальных температур (кривая 1), соответствующего ансамблевого среднего (кривая 2) и ряда значений, рассчитанного по «полному» (т. е. содержащему все коэффициенты w_i) выражению (3) с коэффициентами, найденными из формул (1)—(2) при использовании «укороченного» ряда наблюдений, который охватывает период с 1876 по 1975 г.; эти же коэффициенты использованы для «прогнозирования» глобальных температур с 1976 по 1999 г. (кривая 4). Из рисунка видно, что за весь период, данные наблюдений по которому были использованы для «подгонки» модели (3), расчеты по этой модели значительно лучше согласуются с результатами наблюдений, чем ансамблевые средние.

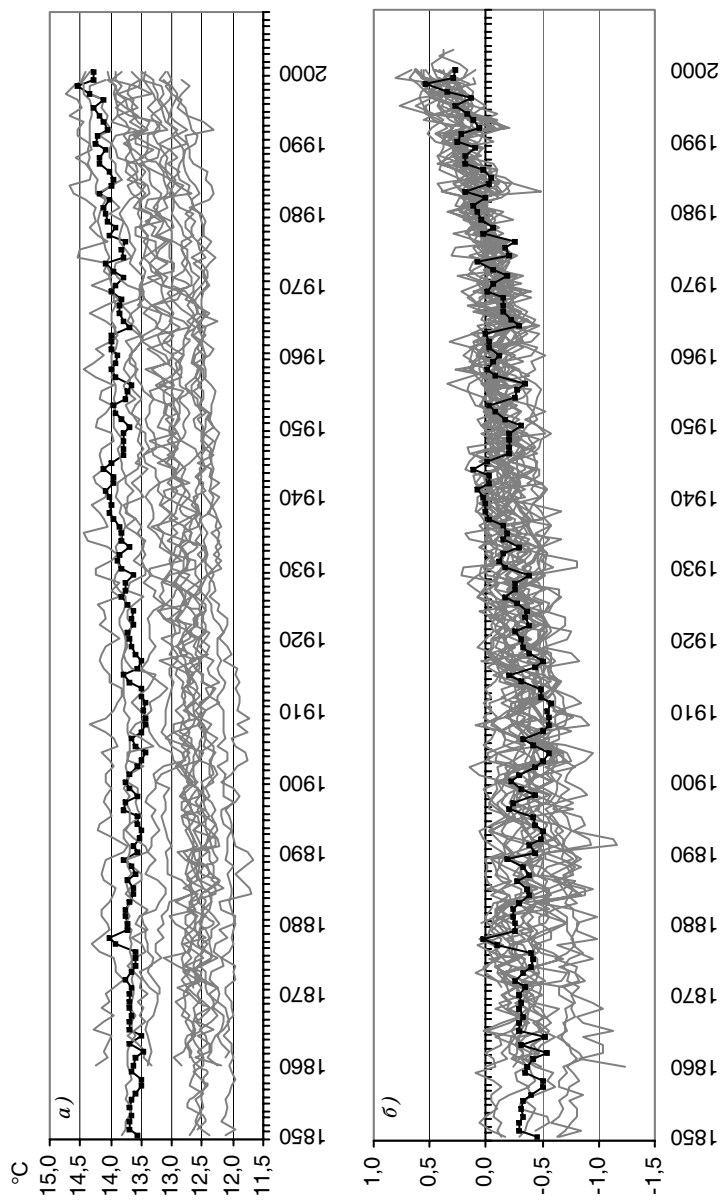


Рис. 1. Среднегодовые глобальные температуры (а) и их аномалии — отклонения от средних значений за 1961 — 1990 гг. (б) за период с 1850 по 2000 г.

Черная кривая — данные наблюдений, серые кривые — модельные данные.

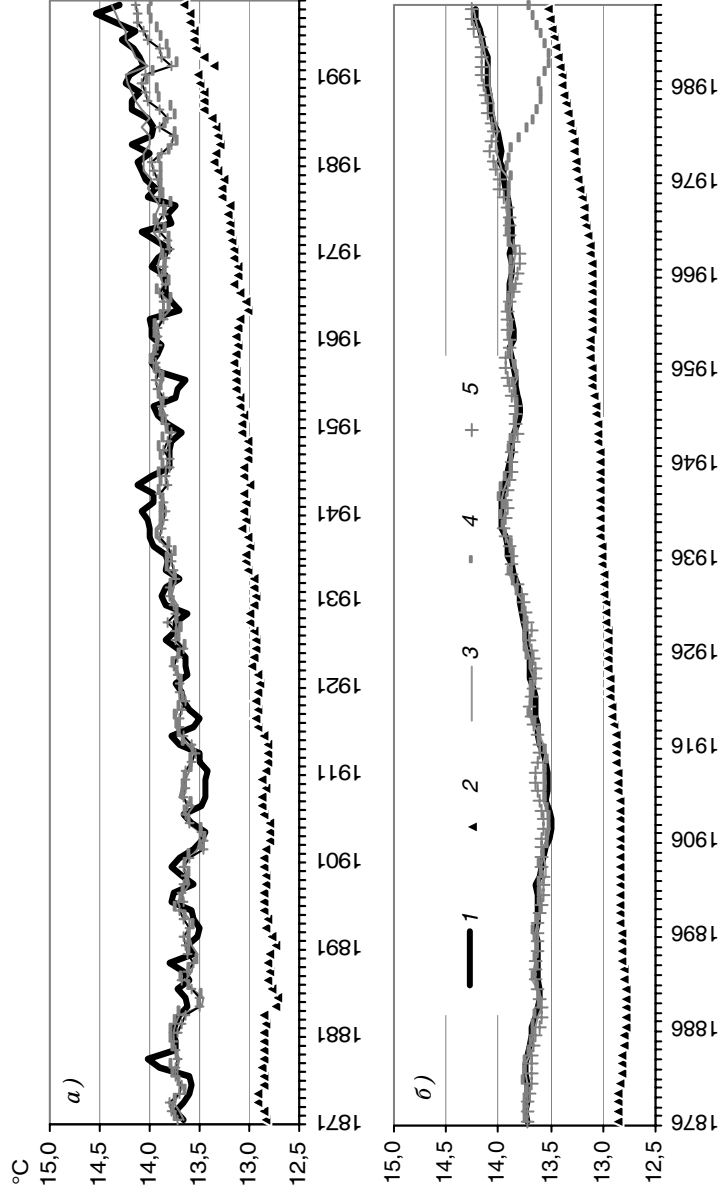


Рис. 2. Сравнение динамики среднегодовой глобальной температуры (кривая 1) с ансамблевыми средними (кривая 2) и результатами расчетов по полной формуле (3) (кривые 3, 4) и по формуле (3) с использованием двух «наиболее информативных» моделей (кривая 5).

a — исходные ряды данных, *б* — фильтрованные.

Вне пределов области подгонки согласие между данными наблюдений и результатами расчетов по полной модели (3) ухудшается и «сдвигается» в сторону среднего по ансамблю (кривая 4). На рис. 2, кроме указанных четырех кривых, приведены результаты расчета по формуле (3) с двумя наиболее «информативными» моделям, упомянутыми в табл. 1 под номерами 7 и 8 (кривая 5). Здесь весовые коэффициенты также определялись по «укороченному» ряду наблюдений за период с 1876 по 1975 г. и оказались равными следующим значениям: $w_0 = 5,7$ °С, $w_7 = 0,39$, $w_8 = 0,22$, остальные значения $w_i = 0$. В этом случае качество прогноза ряда глобальных среднегодовых температур оказывается существенно лучше, чем для среднего по ансамблю: среднеквадратическая погрешность прогноза глобальных температур при указанном выборе весов составила $0,17$ °С, а при ансамблевом прогнозе — $0,7$ °С.

На рис. 2 б соответствующие результаты приведены для «фильтрованных» рядов, полученных из исходных рядов данных наблюдений и модельных расчетов скользящим осреднением за 11 лет. При этом наиболее информативными оказались модели 7 и 6 (см. табл. 1). Соответствующие весовые коэффициенты составили: $w_0 = -3,6$ °С, $w_7 = 0,58$, $w_6 = 0,68$, а среднеквадратическая погрешность оказалась равной $0,05$ °С (при среднеквадратической погрешности ряда средних по ансамблю $0,7$ °С). Как видно, в этом случае эффект от комплексирования моделей, входящих в ансамбль, оказался еще выше.

Для фильтрованных аномалий средней глобальной температуры двумя наиболее информативными также оказались модели 7 и 6, при выборе которых весовые коэффициенты составили: $w_0 = -0,03$ °С, $w_7 = 0,61$, $w_6 = 0,52$, а среднеквадратическая погрешность достигала $0,05$ °С, что сопоставимо со среднеквадратической погрешностью ряда средних по ансамблю, равной $0,06$ °С. Заметим, однако, что в этом случае оказалось значимым дополнительное «включение в комплексирование» модели 11. За этот счет, в частности, среднеквадратическая погрешность уменьшилась до $0,03$ °С, что в два раза меньше погрешности ряда из ансамблевых средних.

При использовании описанного формального аппарата применительно к рядам фильтрованных среднегодовых температур, относящихся к указанному выше периоду наблюдений и осредненных по Северному полушарию, было получено, что наиболее информативными являются также модели 7 и 8, причем весовые коэффициенты составили: $w_0 = 4,2$ °С, $w_7 = 0,56$, $w_8 = 0,23$ (остальные значения $w_i = 0$), а среднеквадратическая погрешность оказалась равной $0,05$ °С (при среднеквадратической погрешности ряда средних по ансамблю $1,7$ °С).

По формуле (3) с учетом приведенных результатов был также выполнен расчет динамики изменения ряда среднегодовых глобальных температур на период до 2030 г. с использованием при определении коэффициентов w_i «полного ряда» данных наблюдений за период 1900—1999 гг. Значимыми оказались три модели: 9, 6 и 7, причем весовые коэффициенты составили: $w_0 = -1,0$ °С, $w_9 = 0,35$, $w_6 = 0,40$, $w_7 = 0,34$.

Результаты этого расчета, приведенные на рис. 3, указывают на то, что прогноз глобальной температуры с использованием

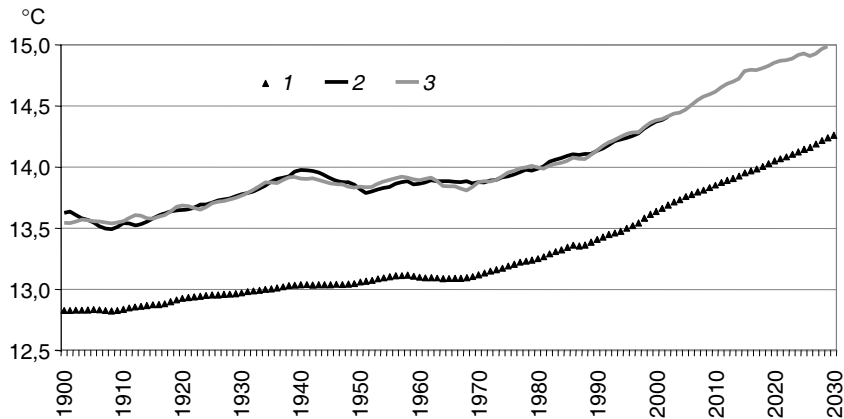


Рис. 3. Сопоставление результатов прогноза средней глобальной температуры до 2030 г. с усвоением фактических данных (3) и с использованием ансамблевого среднего (1), а также фактические данные за период 1900—1999 гг., которые были использованы для «обучения» комплексированной модели (2).

средних по ансамблю идет «примерно параллельно» прогнозу на основе комплексирования моделей, но дает значения среднегодовых глобальных температур, заниженные примерно на 0,5 °С.

5. Обсуждение полученных результатов и выводы

Выполненная работа имеет, главным образом, методический характер. Из нее, в частности, следует, что использование ансамблевого среднего для характеристики ожидаемых климатических изменений, вообще говоря, не приводит к получению эффективных оценок. Так, для рассматриваемого в работе случая средних глобальных температур соответствующая оценка оказалась сильно смещенной. По-видимому, недостаточная эффективность использования ансамблевого среднего как климатической оценки связана с тем, что при этом всем моделям присваивается одинаковый вес, хотя представляется очевидным, что они могут существенно различаться по качеству воспроизведения климатических изменений. Представленный в данной работе подход, который по сути основан на усвоении данных наблюдений с целью определения оптимальных значений весовых коэффициентов, позволяет улучшить качество «воспроизведения климатических изменений прошлого», но делает соответствующие оценки слишком чувствительными к шуму, содержащемуся как в фактических, так и в модельных рядах данных, что препятствует использованию этих оценок для характеристики возможных изменений климата. Процедура же пошаговой оптимизации позволяет уменьшить влияние указанного шума и соответственно уменьшить среднеквадратическую погрешность прогнозов. При этом из всего ансамбля отбирается только некоторое подмножество моделей, комплексирование которых позволяет повысить эффективность оценки.

Естественно, что при переходе от значений средней глобальной температуры к их аномалиям (для каждой модели при этом рассматриваются отклонения от «своего собственного» среднего значения за базисный период с 1961 по 1990 г.) смещение заметно уменьшается. Тем не менее и в этом случае погрешности, получаемые при использовании комплексированной модели, ока-

зываются заметно меньше, чем соответствующие погрешности для ансамблевого среднего.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 2, указывают на то, что для предлагаемого анализа предпочтительным является использование не «первичных» значений среднегодовых глобальных температур, а полученных на их основе путем скользящего осреднения за 10 лет «отфильтрованных» рядов данных. В этом случае преимущества представленного в работе подхода оказываются более заметными.

Следует подчеркнуть, что в настоящей работе в связи с ограниченностью периода, за который имеются фактические данные, была рассмотрена только задача прогнозной оценки возможных климатических изменений на период 20—30 лет, хотя в настоящее время у нас нет оснований полагать, что изложенный аппарат, в принципе, не будет применим при большей заблаговременности. Вместе с тем, можно заметить, что к прогнозным оценкам возможных изменений климата именно такой заблаговременности в настоящее время в мире отмечается особый интерес (см., например, обзор Meehl et al. (2009)).

Предложенный в работе аппарат (при некоторой модификации) применим при решении задач предсказания возможных изменений регионального климата. Выполненные нами расчеты показали, в частности, что при использовании этого аппарата для ансамблевой оценки изменения среднегодовой температуры Северного полушария среднеквадратическая погрешность по сравнению с погрешностью ансамблевого среднего уменьшается в 3—4 раза.

Полученные результаты указывают на то, что число моделей, включенных в ансамбль CMIP, может оказаться избыточным. Это связано с тем, что временные ряды, генерируемые различными моделями в ансамбле, сравнительно тесно коррелированы друг с другом. Заметим, что те модели, которые не были включены в окончательный комплекс, не должны характеризоваться как «второсортные». Ряды средней глобальной температуры, предсказанные на основе этих моделей, не учитываются только потому, что они «являются недостаточно независимыми» от тех рядов, которые были сгенерированы учтенными моделями. Более

того, при изменении пространственного масштаба осреднения (например, при переходе от глобального осреднения к полусферному или к осреднению по определенному региону) состав подмножества моделей, выделенных для комплексирования, может изменяться. Точно так же могут различаться комплексы моделей, отобранные для описания трендов различных климатических элементов (например, температуры и осадков).

В принципе, разработка и применение процедур дискриминации, позволяющих исключить из ансамбля наименее эффективные модели, могут привести к уменьшению неопределенностей прогноза возможных изменений климата. Ключевым при этом, однако, является вопрос о выборе критериев, используемых при такой дискриминации. Применение указанных критериев должно привести к «отбраковке» недостоверных моделей, но при этом обеспечить согласие разбросов ансамблевых расчетов и соответствующих характеристик реальной климатической системы, т.е. «достаточное разнообразие» включенных в окончательный ансамбль моделей. В частности, могут оказаться полезными информационные критерии, характеризующие степень такого согласия. Работы в указанном направлении уже ведутся несколькими научными группами, и в ближайшем будущем можно ожидать дальнейшего прогресса в данной области.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ №№ 08-05-00569-а, 09-05-00814-а) и Национального научного фонда США через посредство Международного центра исследований Арктики (IARC, грант 09-0013/ARC-0652838).

Авторы признательны международному сообществу разработчиков климатических моделей за предоставление данных для анализа; участникам Программы диагноза и сравнения климатических моделей (PCMDI) за сбор и хранение модельных данных; Рабочей группе по объединенным моделям (WGCM) Объединенного научного комитета (JSC) Всемирной

программы исследований климата (WCRP) и программы CLIVAR, их Проекту сравнения объединенных моделей (CMIP) и Группе экспертов по моделированию климата за организацию деятельности по анализу модельных данных; Подразделению технической поддержки (TSU) Первой рабочей группы (WG1) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) за техническую помощь. Архив данных IPCC в Национальной лаборатории Лоренса Ливермора под держивается офисом по науке министерства энергетики США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Говоркова В. А., Катцов В. М., Мелешко В. П., Павлова Т. В., Школьник И. М. (2008). Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчета будущих изменений климата России. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 5—19.
- Дымников В. П., Грицун А. С. (2000). Хаотические аттракторы климатических моделей. Препринт № 293/2000. — М.: ИВМ РАН. — 52 с.
- Катцов В. М., Мелешко В. П. (2008). Современные приоритеты фундаментальных исследований климата. — Труды ГГО, вып. 557, с. 3—19.
- Мелешко В. П. (ред.) (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата. — М., изд. Росгидромета. — 227 с.
- Мелешко В. П., Катцов В. М., Говоркова В. А., Спорышев П. В., Школьник И. М., Шнееров Б. Е. (2008). Климат России в 21-м веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 5—19.
- Brekke L., Dettinger M. D., Maurer E. P., Anderson M. (2008). Significance of model credibility in estimating climate projections distributions for regional hydroclimatological risk assessment. — *Climate Change*, V. 89, p. 371—394. doi: 10.1007/s10584-007-9383-3.
- DelSole T., Tippet M. K. (2007). Predictability: recent insights from information theory. — *Rev. Geophys.*, V. 45, RG4002. doi:10.1029/2006RG000202.
- Delworth T. L., Knutson T. R. (2000). Simulation of early 20th century global warming. — *Science*, V. 287, p. 2246—2250.
- Eckmann J. P., Ruelle D. (1985). Ergodic theory of chaos and strange attractors. — *Rev. Mod. Phys.*, 57, p. 617—656.

- Ehrendorfer M. (2005). Climate predictability. *In: Observed Global Climate* (M. Hantel ed.), Landolt-Boernstein New Series V/6. — Springer, p. 16.1—16.24.
- Epstein E. S. (1969). Stochastic-dynamic prediction. — *Tellus*, V. 21, p. 39—759.
- ERA-40 Reanalysis Project /www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-40
- Eshel G. (2006). Empirically evaluating divergence rates of atmospheric trajectories. — *J. Atmos. Sci.*, V. 63, p. 741—753.
- Forest C. E., M. R. Allen, A. P. Sokolov, P. H. Stone (2001). Constraining climate model properties using optimal fingerprint detection methods. — *Climate Dynamics*, 18, p. 277—295.
- GISS observations data set. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- Gleckler P. J., Taylor K. E., Doutriaux C. (2008). Performance metrics for climate models. — *J. Geophys. Res.*, V. 113, D06104, doi: 10.1029/2007JD00897.
- Kalnay E. (2003). Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. — Cambridge University Press, Cambridge. — 369 p.
- Kleeman R. (2002). Measuring dynamical prediction utility using relative entropy. — *J. Atmos. Sci.*, V. 59, p. 2057—2072.
- Leith C. E. (1974). Theoretical skill of Monte-Carlo forecasts. — *Mon. Wea. Rev.*, V. 102, p. 409—418.
- Lorenz E. N. (1963a). The predictability of hydrodynamic flow. — *Trans. NY Acad. Sci., Series II*, V. 25, p. 400—432.
- Lorenz E. N. (1963b). Deterministic non-periodic flow. — *J. Atmos. Sci.*, V. 20, p. 139—141.
- Lorenz E. N. (1965). A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. — *Tellus*, V. 17, p. 323—333.
- Lorenz E. N. (1968). The predictability of flow which possesses many scales of motion. — *Tellus*, V. 21, p. 289—307.
- Meehl G. A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J. F. B., Stouffer R. J., Taylor K. E. (2007). The WCPM CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research. — *Bull. Amer. Met. Soc.*, V. 88, p. 1383—1394, doi: 10/1175/BAMS-88-9-1383.
- Meehl G. A., Goddard L., Murphy J., Stouffer R. J., Boer G., Danabasoglu G., Dixon K., Gioretta M. A., Greene A. M., Hawkins E., Hegerl G., Karoly D., Keenlyside N., Kimoto M., Kirtman B., Navarra A., Pulwarty R., Smith D., Stammer D., Stockdale T. (2009). Decadal prediction. Can it be skillful? — *Bull. Amer. Met. Soc.*, V. 90, No. 10, p. 1467—1485.

Met Office Hadley Centre observations datasets.
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>
<http://hadobs.metoffice.com/hadcrut3/diagnostics/global>

Shukla J., T. DelSole, M. Fennessy, J. Kinter, and D. Paolino (2006). Climate model fidelity and projections of climate change. — *Geophys. Res. Lett.*, V. 33, L07702, doi: 10.1029/2005GL025579.

Sokolov A. P., Forest C. E., Stone P. H. (2009a). Sensitivity of climate change projections to uncertainties in the estimates of observed changes in deep-ocean heat content. — *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-009-0556-1.

Sokolov A. P., P. H. Stone, C. E. Forest, R. Prinn, M. C. Sarofim, M. Webster, S. Paltsev, C. A. Schlosser, D. Kicklighter, S. Dutkiewicz, J. Reilly, C. Wang, B. Felzer, and H. D. Jacoby (2009b). Probabilistic forecast for 21st century climate based on uncertainties in emissions (without policy) and climate parameters. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Rpt. No 169. — 44 p.

Strauss D., J. Shukla, D. Paolino, Schubert S., Suarez M., Pegion P., Kumar A. (2003). Predictability of the seasonal mean atmospheric circulation during autumn, winter, and spring. — *J. Climate*, V. 16, p. 3629—3649.

Tebaldi C., Knutti R. (2007). The use of the multimodel ensemble in probabilistic climate projections. — *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, V. 365, p. 2053—2075, doi: 10.1098/rsta.2007.2076.

Tippett M. K., DelSole T., Mason S. J., Barnston A. G. (2008). Regression-based method for finding coupled patterns. — *J. Climate*, V. 21, p. 4384—4398.

Youmin Tang, Kleeman R., Moore A. M. (2005). Reliability of ENSO dynamical predictions. — *J. Atm. Sci.*, V. 62, p. 1770—1791.

Youmin Tang, Hai Lin, Derome J., Tippett M. K. (2007). A predictability measure applied to seasonal predictions of the Arctic Oscillation. — *J. Climate*, V. 20, Is. 18, p. 4733—4750.

УДК 551.582.2

ДИСКРИМИНАЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД

Р. В. Бекряев

Санкт-Петербургский государственный университет
199178, 10 линия, д. 33-35
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021, Санкт-Петербург, Карбышева, 7
bekryaev@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2010
Поступила после доработки 31.03.2010

1. Введение

Объективное суждение о сравнительном качестве совместных климатических моделей атмосфера—океан—криосфера можно вынести на основе всестороннего анализа полноты и качества описания физических процессов, обоснованности примененных параметризаций, устойчивости и консервативности вычислительных схем, успешности стыковки отдельных блоков. Однако во многих случаях такая всесторонняя диагностика затруднена или совсем невозможна. Достаточно актуальной по этой причине является дискриминация климатических моделей, основанная на анализе результатов численных экспериментов. Возникающие при этом проблемы обусловлены следующими факторами:

- 1) нелинейностью физических законов, управляющих динамикой климатической системы;
- 2) чрезвычайно высокой размерностью фазового пространства модельных систем;
- 3) наличием нестационарных внешних воздействий на систему.

Совокупность этих факторов означает, что климатическая система, равно как и ее модельные воспроизведения, характеризуется сложной хаотической динамикой, отягощенной к тому же стохастическим компонентом. Решением проблемы, по-видимому, может служить вероятностный подход к дискриминации климатиче-

ских моделей. На самом деле, как большая размерность фазового пространства, так и многообразие описываемых процессов и обратных связей представляют собой основание для применения статистических методов.

Очевидно, что модель, хорошо описывающая одни процессы, может оказаться непригодной для изучения других процессов и явлений. Скажем, адекватное воспроизведение изменений температуры воздуха или интенсивности Северо-Атлантического колебания в течение XX века вовсе не гарантирует столь же успешное описание динамики муссонных осадков в Индии. В связи с этим имеет смысл говорить о вероятностной дискриминации моделей только по отношению к какой-то характеристике (либо группе характеристик), например по отношению к воспроизведению изменений глобальной температуры приземного воздуха (ПТВ).

Поскольку сам термин *дискриминация моделей* еще не имеет устойчивого общепринятого определения, изложим кратко наши соображения по этому поводу. Мы полагаем, что дискриминация моделей не может носить характер ранжирования, а должна определяться априорно задаваемой доверительной вероятностью. Если сгенерированная моделью и наблюдаемая характеристики с заданной доверительной вероятностью относятся к одной и той же генеральной совокупности, то модель следует признать (в отношении этой характеристики) адекватной. В противном случае модель считается неудовлетворительной.

Следует также иметь в виду, что механическое применение обычных статистических критериев может приводить в ряде случаев к сомнительным результатам. Предположим, что модель хорошо воспроизвела общий тренд к потеплению, но внутренняя межгодовая изменчивость, обусловленная собственной низкочастотной динамикой климатической системы, оказалась недооцененной. Скорее всего, формальное сравнение наблюдаемого и смоделированного трендов в этой ситуации покажет, что они различаются незначимо, и модель, следовательно, будет признана адекватной.

Однако возникает вопрос, можно ли относиться к результатам расчетов по такой модели с доверием? Очевидно, что модель, не воспроизводящая внутреннюю низкочастотную изменчивость климатической системы, не может быть использована для оценок

изменений климатической системы. Продемонстрируем это на примере конечно-разностного аналога уравнения Ланжевена, применяемого для статистического моделирования динамики глобальной температуры приземного воздуха:

$$X_{n+1} = \rho X_n + A_n + q_n, \quad (1)$$

где ρ — коэффициент автокорреляции X_n с лагом один.

Пусть для простоты случайное внешнее воздействие q_n представляет собой дельта-коррелированный нормальный процесс с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией $q_n = \delta_n$, а детерминированное внешнее воздействие постоянно: $A_n = A$. В этом случае, произведя замену переменных:

$$X_n = Y_n + \frac{A}{1-\rho},$$

уравнение (1) можно записать следующим образом:

$$Y_{n+1} = \rho Y_n + \delta_n, \quad (2)$$

т. е. привести к стандартному виду модели авторегрессии первого порядка (*AR-1*).

Легко показать, что математическое ожидание $M[Y_n] = 0$, а дисперсия $D[Y_n] = \frac{1}{1-\rho^2}$. Соответственно

$$M[X_n] = \frac{A}{1-\rho}, \quad D[X_n] = D[Y_n] = \frac{1}{1-\rho^2}.$$

Таким образом, оказывается, что отклик системы на стационарное внешнее воздействие определяется не только интенсивностью воздействия, но и диссипацией в системе, которая, в свою очередь, связана с корреляционной функцией процесса X_n . Следовательно, вероятностная дискриминация моделей должна включать в себя анализ характеристик изменчивости.

Сформулируем основные теоретические предположения для вероятностной дискриминации климатических моделей.

1. При постоянном детерминированном внешнем воздействии и/или при стационарном в статистическом смысле случайном внешнем воздействии численные реализации моделей представляют собой выборки из стационарных случайных процессов. Временные ряды характеризуются соответственно плотностью вероятности и корреляционной функцией. Для глобальной температуры предположение о нормальности распределения должно выполняться с высокой степенью точности в силу центральной предельной теоремы. Поэтому смоделированные ряды глобальной приземной температуры воздуха характеризуются всего двумя параметрами — математическим ожиданием и корреляционной функцией.

2. При наличии внешнего неслучайного воздействия (такого как антропогенный форсинг) численные реализации моделей можно в первом приближении рассматривать как суперпозицию обусловленного им тренда и стационарного случайного процесса, сгенерированного нелинейной динамической системой. Мы оставляем за рамками нашего анализа влияние внешнего форсинга на все статистические моменты за исключением математического ожидания, полагая форсинг аддитивным по отношению к вариациям модельных климатов.

Отдельное место в анализе занимает предварительное удаление из временных рядов внешне индуцированного тренда («детрендация»). Такой, обусловленный внешним форсингом тренд приводит при спектральном анализе к большим искажениям в оценках внутренне индуцированной изменчивости, особенно в области низких частот.

Во втором разделе работы мы рассматриваем воспроизведение различных статистических параметров глобальной температуры приземного воздуха в численных экспериментах с моделями СМIP3 (Meehl et al., 2007). В третьем разделе обсуждаются вопросы, связанные с оценкой времени декорреляции и эффективного размера выборки. Четвертый раздел посвящен оцениванию однородности выборочных параметров при учете связности временных рядов. Предлагается методика дискриминации климатиче-

ских моделей, основанная на вероятностном подходе. В пятом разделе разработанная методика применяется для вероятностного оценивания качества воспроизведения глобальной температуры приземного воздуха в экспериментах с моделями СМIP3. В последнем, шестом разделе приводятся краткие выводы и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

2. Воспроизведение моделями основных статистических параметров глобальной ПТВ

На рис. 1 представлены результаты оценок средней глобальной ПТВ в моделях СМIP за 1900—1999 гг. Рассматриваются результаты 61 численного эксперимента по 21 модели, участвующей в проекте СМIP3. Во всех модельных расчетах изменение концентрации CO_2 в XX веке соответствует наблюдаемому. Очевидно, что для отдельных модельных реализаций отличие оценок ПТВ от результатов наблюдений достаточно велико и достигает 3 К.

Приведенный на рис. 2 набор оценок дисперсий для различных моделей демонстрирует весьма значительный разброс. Предварительное удаление линейного тренда существенно уменьшает значения выборочных дисперсий, однако различия оценок по разным моделям остаются большими. Столь же значительные вариации демонстрируют оценки трендов, приведенные на рис. 3, и представленные на рис. 4 оценки спектральных плотностей на

нулевой частоте $\hat{S}_X(0) = \frac{1}{\pi} \hat{\sigma}_X^2 \left(1 + 2 \sum_{k=1}^m \hat{\rho}_k \right)$.

На рисунке приведены значения $\left(\hat{S}_X(0) \right)^{\frac{1}{2}}$, где $\hat{\sigma}_X^2$ — оценка дисперсии, $\hat{\rho}_k$ — оценка коэффициента автокорреляции с лагом k , m — максимальное число задержек автокорреляционной функции. В расчетах принималось $m = \frac{N}{10}$, где N — объем выборки.

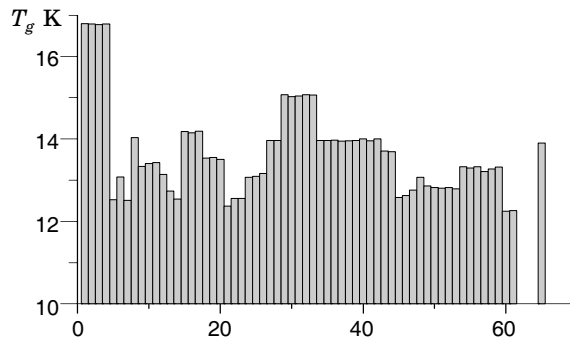


Рис. 1. Оценки средней многолетней глобальной температуры T_g за 1900—1999 гг. по результатам экспериментов с моделями СМІР (61 эксперимент). Крайний справа столбик — оценка средней многолетней глобальной температуры приземного воздуха по данным наблюдений (NCDC) за 1901—2000 гг.

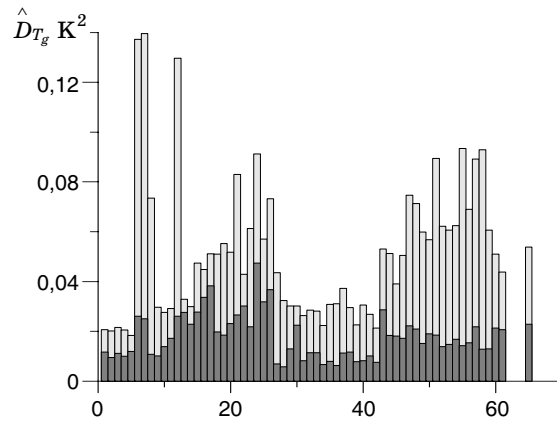


Рис. 2. Оценки дисперсии глобальной температуры \hat{D}_{T_g} за 1900—1999 гг. по результатам экспериментов с моделями СМІР.

Крайний справа столбик — оценка дисперсии ПТВ по данным наблюдений (CRUTEM3VNH) за 1900—1999 гг. Светлые столбики — исходные временные ряды, темные — временные ряды после удаления линейного тренда.

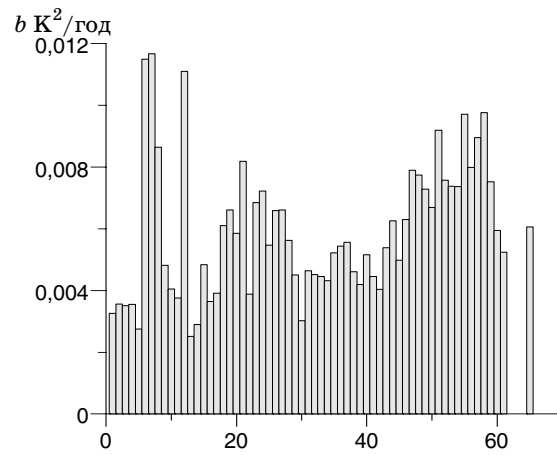


Рис. 3. Линейные тренды b глобальной ПТВ за 1900—1999 гг. по результатам экспериментов с моделями CMIP.

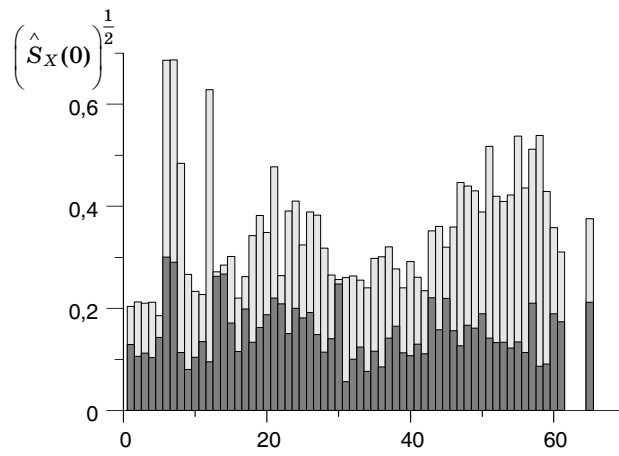


Рис. 4. Непараметрические оценки спектральной плотности на нулевой частоте $\hat{S}_X(0)$. Приведены

значения $\left(\hat{S}_X(0)\right)^{\frac{1}{2}}$.

3. Оценка времени декорреляции и эффективного размера выборки

Климатические временные ряды, как полученные из наблюдений, так и модельные, характеризуются высоким уровнем автокоррелированности (связности). Это означает, что эффективный размер выборки оказывается существенно меньше, чем длина ряда (von Storch, Zwiers, 1999). Например, при оценке среднего выборочного значения время декорреляции определяется соотношением $\tau_{\bar{X}} = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \rho_k$. Для модели авторегрессии пер-

вого порядка время декорреляции $\tau_{\bar{X}} = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \rho_k = \frac{1+\rho}{1-\rho}$. Оценка

коэффициента автокорреляции с лагом в один год для ряда среднегодовой глобальной температуры составляет $\sim 0,8$. Соответственно время декорреляции $\tau \approx 9$, и, следовательно, эффективный размер выборки должен быть уменьшен в девять раз.

К сожалению, оценка времени декорреляции также представляет собой случайную величину, функция распределения которой в общем случае неизвестна, так что требуется привлечение специальных подходов для сравнения климатических параметров. Приведенные на рис. 5 оценки времени декорреляции демонстрируют значительную изменчивость, в том числе внутри ансамблей экспериментов с одной моделью.

Эффективный размер выборки при оценке дисперсии $\tau_{Var} = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \rho_k^2$. Хотя оценки $\hat{\tau}_{Var}$ демонстрируют в целом не-

сколько более стабильное поведение, чем $\hat{\tau}_{\bar{X}}$, отдельные выбросы остаются весьма значительными (рис. 6).

4. Оценивание однородности параметров при учете автокоррелированности

Мы предлагаем осуществлять дискриминацию климатических моделей в отношении воспроизведения глобальной температуры в четыре этапа. На каждом этапе сопоставляются выбороч-

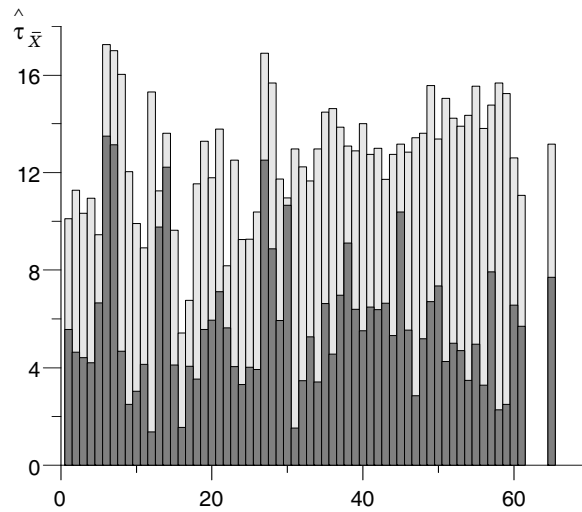


Рис. 5. Непараметрические оценки времени де-

$$\text{корреляции } \hat{\tau}_{\bar{x}} = 1 + 2 \sum_{k=1}^m \rho_k.$$

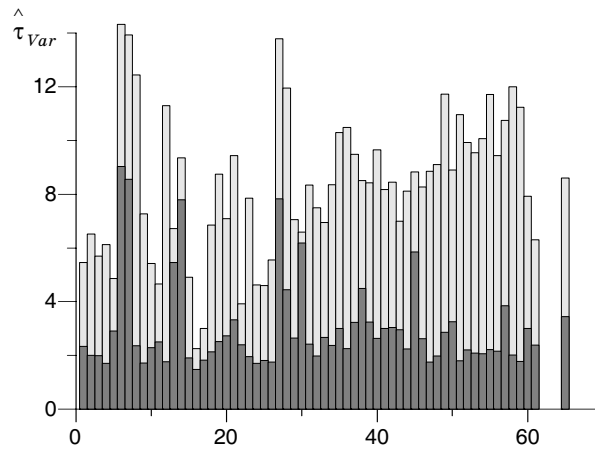


Рис. 6. Непараметрические оценки времени

$$\text{декорреляции } \hat{\tau}_{var} = 1 + 2 \sum_{k=1}^m \rho_k^2.$$

ные оценки, полученные на основе модельных расчетов и результатов наблюдений:

1) по критерию Фишера сравниваются выборочные оценки дисперсии наблюдаемой температуры приземного воздуха с результатами модельных расчетов,

2) по критерию Фишера сравниваются выборочные оценки спектральной плотности на нулевой частоте для ряда наблюдений и для модельных временных рядов,

3) по критерию Стьюдента оценивается разность выборочных средних значений ПТВ,

4) по критерию Стьюдента сравнивается разность выборочных трендов.

Оценивание однородности выборочных дисперсий

Рассмотрим выборки двух нормально распределенных случайных величин X и Y , характеризуемых дисперсиями σ_X^2 и σ_Y^2 и соответственно объемами n_X и n_Y . Если дисперсии генеральных совокупностей равны ($\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = \sigma^2$), то отношение выборочных дисперсий

$$F = \frac{\hat{\sigma}_X^2}{\hat{\sigma}_Y^2} \quad (3)$$

подчиняется распределению Фишера—Снедекора:

$$f(F) = \begin{cases} \frac{\Gamma\left(\frac{n+m}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)\Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} \left(\frac{n}{m}\right)^{\frac{n}{2}} \frac{F^{\frac{n-2}{2}}}{\left(1 + \frac{n}{m}F\right)^{\frac{n+m}{2}}} & \text{при } F \geq 0, \\ 0 & \text{при } F < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $n = n_X - 1$ и $m = n_Y - 1$ представляют собой число степеней свободы для выборочных дисперсий X и Y , Γ — гамма-функция.

Полагая, что выборочное значение дисперсии X не меньше, чем выборочная оценка дисперсии Y , т. е. что $\hat{\sigma}_X^2 \geq \hat{\sigma}_Y^2$, получают решающее правило проверки гипотез. Если полученное по формуле (3) значение $F \leq F_{1-\alpha, n, m} \Rightarrow H_0$, принимается гипотеза об однородности дисперсий. Если $F > F_{1-\alpha, n, m} \Rightarrow H_1$, нулевая гипотеза отвергается на уровне значимости α .

К сожалению, применение критерия Фишера—Снедекора предполагает независимость испытаний. Если применить этот критерий непосредственно для сравнения оценок дисперсии глобальной ПТВ, полученной в экспериментах СМІР и рассчитанных на основе анализа наблюдений, то только в 27 модельных прогнозах дисперсию можно признать однородной. На самом деле, все обстоит не так плохо, поскольку вследствие автокоррелированности временных серий эффективный размер выборки значительно уступает их длине. Эффективный размер выборки $N_{ef} = \frac{N}{\tau_{Var}}$, а время декорреляции τ_{Var} , как правило, существенно превышает единицу (см. рис. 6). Однако вопрос о том, какое время декорреляции следует принять для оценок выборочной дисперсии, остается открытым. Для дальнейших расчетов мы выбрали $\tau_{Var} = 4$, что в большинстве случаев превышает полученные оценки времени декорреляции. Эффективный размер выборки при этом составляет $N_{ef} = 25$.

Оценивание однородности спектральной плотности

Известно, что нормированные оценки спектральной плотности $\frac{\hat{S}_X(\omega)}{S_X(\omega)}$ имеют распределение, весьма близкое к распределению χ_n^2 , где n — эффективное число степеней свободы. Для спектральных интервалов $\omega \in [0, \Delta\omega]$ и $\omega \in [\omega_{\max} - \Delta\omega, \omega_{\max}]$ эффективное число степеней свободы $n = \frac{N}{2m}$, для остальных спек-

тральных интервалов $n = \frac{N}{m}$. Поэтому проверка однородности спектральных плотностей в любом диапазоне частот не вызывает проблем и основывается на критерии Фишера—Снедекора. Мы будем оценивать однородность спектральных плотностей $\hat{S}_X(\omega)$ только в наиболее важном диапазоне ультранизких частот, т. е. для так называемой нулевой частоты.

Следуя рекомендациям Дженкинса и Ваттса (1971), примем максимальное число сдвигов корреляционной функции равным $m = \frac{N}{10}$. В этом случае эффективное число степеней свободы n равно пяти. Однако при предварительном удалении линейного тренда эффективное число степеней свободы у оценки спектральной плотности на нулевой частоте $\hat{S}_X(0)$ уменьшается на единицу (Векругаев et al., 2010). Таким образом, эффективное число степеней свободы оказывается равным четырем ($n = 4$). Предположение об однородности спектральных плотностей отвергается, если отношение их выборочных оценок превышает квантильное значение.

Оценивание однородности выборочных средних значений

Рассмотрим сначала оценивание однородности выборочных средних значений для процессов с независимыми испытаниями. Будем снова полагать, что у нас имеются выборки двух нормально распределенных случайных величин X_1 и X_2 , характеризующихся математическими ожиданиями $M[X_1]$ и $M[X_2]$, дисперсиями σ_1^2 и σ_2^2 и соответственно объемами n_1 и n_2 . Если $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, то можно ввести t -статистику Стьюдента:

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - M[\bar{X}_1 - \bar{X}_2]}{\left(\hat{D}[\bar{X}_1 - \bar{X}_2]\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

где \hat{D} — выборочная дисперсия.

В качестве нулевой гипотезы предполагается равенство математических ожиданий случайных величин X_1 и X_2 , т. е. $M[X_1 - X_2] = M[X_1] - M[X_2] = 0$, поэтому выражение (5) принимает вид

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left(\hat{D}[\bar{X}_1 - \bar{X}_2] \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (6)$$

Эффективное число степеней свободы $n_{ef} = n_1 + n_2 - 2$. Поскольку случайные величины X_1 и X_2 независимы, то $D[\bar{X}_1 - \bar{X}_2] = D[\bar{X}_1] + D[\bar{X}_2] = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$, так что

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (7)$$

где S_1 и S_2 — соответственно оценки СКО случайных величин X_1 и X_2 , т. е. $S_1^2 = \hat{D}[X_1]$, $S_2^2 = \hat{D}[X_2]$.

Если $n_1 \neq n_2$, обычно вместо (7) используют другое выражение, позволяющее более точно учесть СКО разности (Wilks, 1995):

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left(\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} \right)^{\frac{1}{2}} S_*}, \quad (8)$$

где S_* — обобщенная оценка СКО:

$$S_* = \left(\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

При совпадении объемов выборок ($n_1 = n_2 = n$) формулы (7) и (8) идентичны.

При наличии автокорреляции сравнение выборочных средних усложнено, поскольку эффективный размер выборки может оказаться существенно меньше, чем в случае процессов с независимыми испытаниями. В ряде работ (см., например, работу Wilks (1995)) предлагается оценивать эффективный размер выборки на

основе расчета времени декорреляции $n_{ef} = \frac{N}{\tau_{\bar{X}}}$. В частности,

предлагается использовать схему для процесса авторегрессии первого порядка. В этом случае $n_{ef} = N \frac{1-\rho}{1+\rho}$. К сожалению, при-

менимость такого подхода носит весьма ограниченный характер, поскольку не только предполагает, что изучаемый процесс с достаточной степенью достоверности может быть описан моделью AR-1, но и требует информации о точном значении параметра ρ .

Другой подход (Zwiers, von Storch, 1995) основан на введении статистики Стьюдента при непараметрическом оценивании дисперсии выборочного среднего.

Вернемся к рассмотрению формулы (6). Для независимых случайных величин X_1 и X_2 выражение для статистики t может быть записано в следующем виде:

$$t_{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left(\hat{D}[\bar{X}_1] + \hat{D}[\bar{X}_2] \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (9)$$

Дисперсия выборочного среднего, в свою очередь, описывается соотношением

$$D[\bar{X}] = \frac{2}{T} \int_0^T B_X(\tau) \left(1 - \frac{\tau}{T} \right) d\tau. \quad (10)$$

Асимптотически для процессов с интегрируемой корреляционной функцией, справедливо выражение

$$D[\bar{X}] = \frac{2}{T} \int_0^T B_X(\tau) d\tau = \frac{2\pi S_X(0)}{T}. \quad (11)$$

Оценка дисперсии выборочного среднего может быть произведена по формуле

$$\hat{D}[\bar{X}] = \frac{2\pi \hat{S}_X(0)}{N-1}, \quad (12)$$

где $\hat{S}_X(0)$ — непараметрическая оценка спектральной плотности на нулевой частоте.

Статистика $t_{\bar{X}}$, задаваемая формулой (12), будет подчиняться распределению Стьюдента, однако эффективное число степеней свободы в этом случае определяется не длиной ряда, а максимальным числом сдвигов m автокорреляционной функции,

$$n_{ef} = \frac{N}{2m}.$$

Оценивание однородности выборочных линейных трендов

Определение принадлежности выборочных линейных трендов к одной генеральной совокупности целесообразно проводить по той же принципиальной схеме, что использовалась для сравнения выборочных средних.

Пусть глобальная температура описывается линейной моделью: $T_g(t) = a + bt + \varepsilon$, где ε — внутренняя изменчивость климатической системы. Для трендов b_1 и b_2 , полученных по двум независимым выборкам, выражение для статистики t может быть записано следующим образом:

$$t_b = \frac{\hat{b}_1 - \hat{b}_2}{\left(\hat{D}[\hat{b}_1] + \hat{D}[\hat{b}_2] \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (13)$$

Дисперсия выборочного тренда, в свою очередь, описывается соотношением

$$D[b(T)] = \frac{12 \cdot 2}{T^3} \int_0^T B_x(\tau) \left[1 - \frac{3\tau}{T} + \frac{2\tau^3}{T^3} \right] d\tau. \quad (14)$$

Асимптотически для процессов с интегрируемой корреляционной функцией

$$D[\bar{X}] = \frac{2 \cdot 12}{T^3} \int_0^T B_X(\tau) d\tau = \frac{2 \cdot 12\pi S_X(0)}{T^3}. \quad (15)$$

Для оценки дисперсии выборочного тренда можно использовать формулу

$$\hat{D}[\bar{X}] = \frac{24\pi \hat{S}_X(0)}{(N-1)^3}. \quad (16)$$

Статистика t_b , так же как и статистика $t_{\bar{X}}$, будет подчиняться распределению Стьюдента.

5. Оценивание воспроизведения глобальной ПТВ моделями СМІР

Тест на воспроизведение дисперсии, проведенный на основе критерия Фишера—Снедекора при эффективном размере выборки $N_{ef} = 25$, был успешно пройден в 42 экспериментах. Из моделей, не прошедших тест, отметим `giss_er`, продемонстрировавшую в остальных отношениях хорошее соответствие наблюдаемым значениям глобальной ПТВ. Тестирование спектральной плотности на нулевой частоте не было пройдено только в трех экспериментах. По-видимому, такое расхождение с результатами сравнения оценок дисперсии объясняется малым значением эффективного числа степеней свободы при спектральном анализе.

Применение критерия Стьюдента показало, что только в 12 экспериментах среднее значение глобальной температуры вос-

производится адекватно. Такой неудовлетворительный результат, помимо недостатков в физическом содержании моделей, может быть обусловлен следующими причинами. Первая из них заключается в том, что основное внимание исследователей, по видимому, было направлено на воспроизведение изменений климатической системы, а не ее равновесного состояния. Вторая причина может быть чисто статистической. На самом деле, при росте числа членов ансамбля или при увеличении временного интервала моделирования может возникнуть проблема, которую мы назовем парадоксом размера ансамбля. Этот парадокс заключается в том, что при неограниченном увеличении размера выборки статистически значимыми становятся отличия оценок параметров по любым сколь угодно «хорошим» моделям. В такой ситуации кажется разумным введение дополнительного нестатистического критерия, основанного на физических соображениях и обусловленного характером решаемых задач. Например, если различие между средней глобальной температурой, полученной из результатов наблюдений, и средней глобальной температурой, воспроизведенной моделью, оказывается меньше некоего граничного значения, то можно полагать, что модель с достаточной точностью воспроизводит этот параметр и не нуждается в дальнейшем статистическом контроле. В качестве граничного значения можно принять 0,5 К, что примерно соответствует половине размаха колебаний наблюдаемой глобальной ПТВ.

Результаты сравнения однородности выборочных линейных трендов разительно отличаются от картины, полученной при сравнении выборочных средних. Для всех модельных расчетов, за исключением прогона по модели `spgm`, воспроизведенные линейные тренды оказались однородными с оценкой тренда по результатам наблюдений.

Проверка адекватности моделей по всей совокупности предложенных тестов выявила, что к безусловным лидерам относятся модели `echam`, `echo` и `hadcm3`, все прогоны по которым благополучно выдержали набор тестовых испытаний. На рис. 7 приведена глобальная температура, оцененная по данным наблюдений `CRUTEM3vnh`, и глобальная температура, осредненная по всем экспериментам с моделями `echam`, `echo` и `hadcm3`.

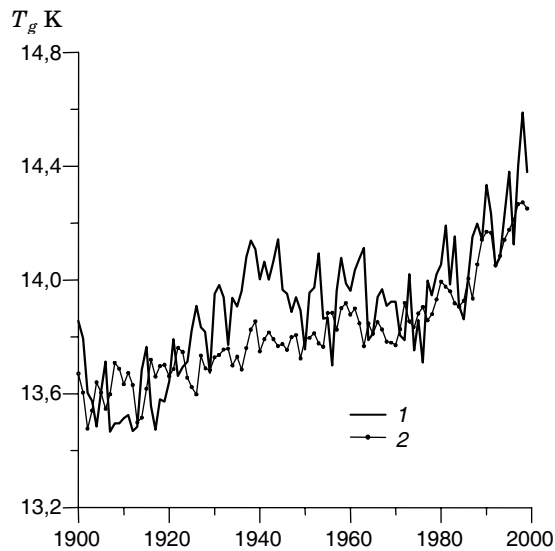


Рис. 7. Глобальная температура, оцененная по данным наблюдений CRUTEM3vnh (1), и глобальная температура, осредненная по всем численным экспериментам с моделями ecam, echo и hadcm3 (2).

Понятно, что осреднение результатов по ансамблю моделей должно было привести (и привело) к уменьшению внутренней межгодовой изменчивости. В то же время модельные данные продемонстрировали существенно меньший положительный тренд, особенно в последние два десятилетия (1980—1999). Для того чтобы выяснить, является ли это следствием низкочастотной изменчивости, проявившейся в данных наблюдений на ограниченной выборке в виде переоцененного тренда, или отражает недостаточный отклик моделей на внешний форсинг, требуются дальнейшие исследования. Следует отметить, что только в двух случаях (из 61) статистический и нестатистический критерии оценивания разности средних значений дали различные резуль-

таты. Такое согласие говорит о том, что стандартный статистический анализ позволяет получать вполне разумные с физической точки зрения результаты.

6. Заключение

Разработанная методика дискриминации климатических моделей основана на традиционных вероятностных подходах и предполагает тестирование воспроизведения отдельного выбранного параметра. Методика позволяет учитывать коррелированность временных рядов, т. е. наличие собственной низкочастотной изменчивости в климатической системе и ее модельных воспроизведениях. Такое свойство неотъемлемо от климатических временных серий и является критически важным при их статистическом описании. Из моделей, участвовавших в программе СМIP3, тестовые испытания прошли еcam, echo и hadcm3, продемонстрировавшие адекватное воспроизведение как среднего значения глобальной приземной температуры воздуха и ее тренда, так и характеристик изменчивости — дисперсии и спектральной плотности на нулевой частоте.

Дальнейшее развитие методики может, по-видимому, идти по двум направлениям. Во-первых, при наличии ансамбля экспериментов с одной моделью (различающихся только начальными условиями) имеет смысл перейти к критериям, позволяющим оценивать качество модели по такому ансамблю в целом. Во-вторых, остается нерешенным вопрос о мере искажений, вносимых в оценки дисперсии и спектральной плотности процесса при удалении линейного тренда. Понятно, что в действительности внешний форсинг меняется со временем нелинейно, и, следовательно, использованная аппроксимация вносит достаточно существенные искажения в статистические оценки.

Автор выражает глубокую благодарность Т. В. Павловой за предоставленные результаты расчетов по климатическим моделям, участвовавшим в проекте СМIP3.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 08-05-00569-а) и На-

ционального научного фонда США через посредство Международного центра исследований Арктики (IARC, грант 09-0013/ARC-0652838). Автор признателен международному сообществу разработчиков климатических моделей за предоставление данных для анализа, участникам Программы диагноза и сравнения климатических моделей (PCMDI) за сбор и хранение модельных данных, Рабочей группе по объединенным моделям (WGCM) Объединенного научного комитета (JSC) Всемирной программы исследований климата (WCRP) и программы CLIVAR, их Проекту сравнения объединенных моделей (CMIP) и Группе экспертов по моделированию климата за организацию деятельности по анализу модельных данных, а также Подразделению технической поддержки (TSU) Первой рабочей группы (WG1) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) за техническую помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дженкинс Г., Ваттс Д. (1971). Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1. — М.: Мир, с. 317.
- Векряев R. V., I. V. Polyakov, V. A. Alexeev. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. — J. Climate (accepted).
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer and K. E. Taylor (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. — BAMS, 88, p. 1383—1394, DOI: 10.1175/BAMS-88-9-1383.
- Von Storch H., Zwiers F. W. (1999). Statistical analysis in climate research. — Cambridge University Press, Cambridge, UK. — 494 p.
- Wilks D. S. (1995). Statistical Methods in the atmospheric sciences. — Academic Press. — 464 p.
- Zwiers F. W., von Storch H. (1995). Taking serial correlation into account in tests of the mean. — J. Climate, V. 8, p. 336—351.

УДК 551.465

**ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ
ВЕРХНЕГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ В КЛЮЧЕВЫХ
РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА**

Р. С. Бортковский, Б. Н. Егоров

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

Поступила в редакцию 27.01.2010

Введение

Современные оценки энерго- и газообмена между океаном и атмосферой базируются на диффузионных формулах. В них поток определяется как произведение зависящих от скорости ветра коэффициентов сопротивления, тепло- или влагообмена, скорости газообмена и перепада соответствующего параметра между поверхностью раздела и приводным слоем воздуха или приповерхностным слоем воды. При этом по умолчанию предполагается, что перепад от скорости ветра не зависит и остается постоянным. Однако такой подход представляется оправданным только при умеренной скорости ветра и при постоянстве условий в верхнем слое океана. При таких серьезных изменениях, как наблюдающиеся в экваториальной зоне Тихого океана проявления Южного колебания, он вряд ли применим. Использование одномерной численной модели, ранее примененной для решения различных задач (Бортковский, 2006; Бортковский и др., 2007) в этой зоне Тихого океана, а также в областях Гольфстрима и Куроисио, требует определенной осторожности. Поскольку газообмен океана с атмосферой изучен хуже, чем обмен теплом, влагой и импульсом, ему и будет в этой работе уделено наибольшее внимание.

С целью проверки применимости одномерной модели в экваториальной зоне Тихого океана и в областях Гольфстрима и Куроисио привлекаются данные о структуре океанографических полей. Данные о средних профилях температуры, солености и со-

держания кислорода содержатся в электронном атласе (Levitus, Boyer, 1994), а данные о профилях параметров карбонатной системы воды — щелочности и полном содержании растворенного неорганического углерода — на Интернет-сайте Центра сбора и анализа данных о карбонатной системе (CDIAC) США (<http://cdiac3.ornl.gov/las/servlets/data>). Кроме этих источников средних климатических данных, в Интернете появились сайты, представляющие данные, относящиеся к конкретному времени наблюдения; ссылки на них будут даны ниже.

Использование одномерной численной модели обоснованно только в том случае, если вертикальные притоки рассматриваемых элементов структуры океана намного больше горизонтальных. Оценке и сопоставлению притоков в ключевых районах Мирового океана посвящена эта работа.

1. Особенности условий в экваториальной зоне восточной части Тихого океана

Наиболее яркая особенность региона — широко известное явление Эль-Ниньо. Оно составляет одну из фаз Южного колебания (El Niño/Southern Oscillation). Вторую фазу этого колебания, не имеющего четкой периодичности, составляет явление Ла-Нинья (см. в Интернете сайт: [www//El-Nino\El-Nino%20Southern%20Oscillation%20\(ENSO\).htm](http://www//El-Nino\El-Nino%20Southern%20Oscillation%20(ENSO).htm)).

При явлении Эль-Ниньо температура поверхности океана в зоне холодного Перуанского течения заметно повышается. Это повышение достигает иногда 4 °С в районе с координатами центра 0° ш., 90° з. д. При явлении Ла-Нинья понижение температуры воды здесь может составить 3 °С.

Анализ данных о климатических параметрах поля скорости ветра (сайт http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/db_search/SearchMenu.pl) показал, что в экваториальной зоне Тихого океана они практически не связаны с фазами Южного колебания. Были рассмотрены характеристики скорости ветра над океаном (0° ш., 90° з. д.) при выраженных фазах Южного колебания. Средние скорости ветра за указанный месяц данного года, а также среднемесячная скорость и среднеквадратичное отклонение вычисля-

лись по 23-летнему ряду наблюдений (1980—2002 гг.). Межгодовая изменчивость среднемесячной скорости оказалась небольшой. Для периода март—июнь, в который действие Южного колебания проявляется сильнее всего, средняя многолетняя скорость ветра в точке 0° ш., 90° з. д. составляет около 3 м/с. При столь малой средней скорости усиление ветра даже до 7—8 м/с оказывается маловероятным (Бортковский, Егоров, 2003). В связи с этим, если не учитывать колебаний перепада содержания газа вода—воздух, потоки газа через морскую поверхность могут быть оценены на основе стандартного подхода, т. е. как произведение зависящей от скорости ветра скорости газообмена (Wanninkhof, 1992) на перепад концентрации растворенного газа между поверхностью раздела и водой. Однако вопрос о величине этого перепада, точнее о его изменениях, остается открытым.

Представление об изменениях температуры поверхности в точке 0° ш., 90° з. д. при проявлениях Южного колебания дает табл. 1. Среднемесячные значения температуры относятся к выраженному явлению Эль-Ниньо (сентябрь 1997 г. — январь 1998 г.) и к явлению Ла-Нинья (лето 1988 г.). В таблице также приведены отклонения температуры от нормальных климатических значений (δT).

На рис. 1 представлены профили температуры воды на экваторе в точках 0° ш., 90° з. д. (кривые 1, 3) и 0° ш., 140° з. д. (кривые 2, 4) при средних климатических условиях (кривые 1, 2) и при Эль-Ниньо в январе 1998 г. (кривые 3, 4). При нормальных условиях более близкие к континенту воды заметно холоднее, но

Таблица 1

Среднемесячная температура поверхности (T) при Эль-Ниньо 1997/98 г. и Ла-Нинья 1988 г. и отклонения от климатической нормы (δT)

	1997/98 г.					1988 г.		
	IX	X	XI	XII	I	VI	VII	VIII
T °C	26,79	26,57	27,64	28,54	29,57	21,65	20,93	21,13
δT °C	4,31	3,79	4,46	4,86	4,64	-1,92	-1,99	-1,37

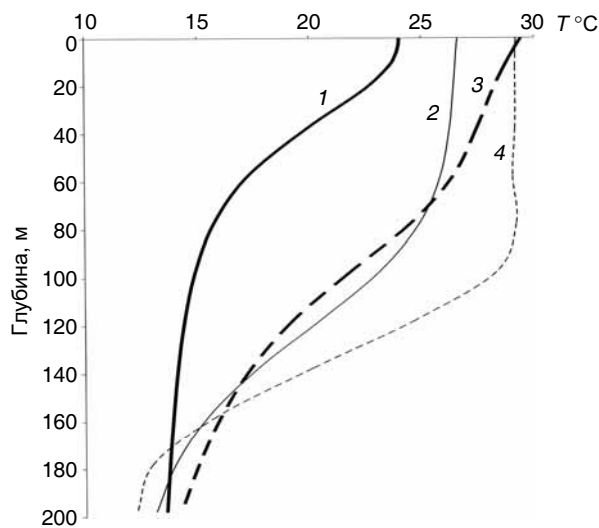


Рис. 1. Профили температуры воды на экваторе при средних условиях (1, 2) и при Эль-Ниньо в январе 1998 г. (3, 4).

1, 3 — 90° з. д.; 2, 4 — 140° з. д.

при Эль-Ниньо это различие почти исчезает. На рис. 2 приведены профили солености в тех же точках и при тех же условиях. При Эль-Ниньо соленость заметно уменьшается, при Ла-Нинья — увеличивается.

По современным представлениям, экваториальная зона океанов — основной источник CO_2 для атмосферы: в этой зоне Тихого океана сосредоточено 72 % полной эвазии CO_2 из Мирового океана. Есть данные о влиянии Эль-Ниньо на газообмен, но количественно этот эффект не изучен (Feely et al., 1999). По заключению цитируемых авторов, уменьшение потока CO_2 при Эль-Ниньо в 1994 г. на 1/3 объясняется наблюдавшимся ростом парциального давления газа в атмосфере. Вообще же, поток CO_2 при Эль-Ниньо составлял 30—80 % потока при средних «нормальных» условиях.

Поскольку данные о содержании CO_2 в верхнем слое океана в конкретные годы остаются недоступными, авторами была прове-

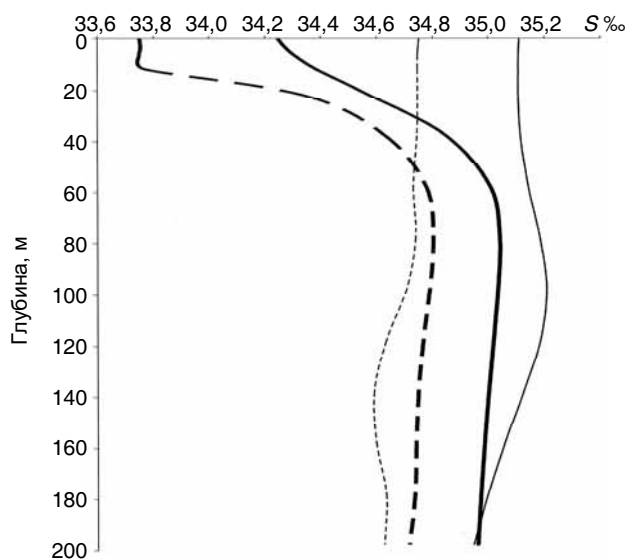


Рис.2. Профили солёности S на экваторе.
Усл. обозначения см. рис. 1.

дена оценка влияния на газообмен только изменений температуры и солёности в предположении о постоянстве абсолютного содержания CO_2 в воде. Осредненное содержание CO_2 в верхнем 200-метровом слое океана было найдено по опубликованным в Интернете (см. выше адрес сайта CDIAC) данным реанализа о распределении элементов карбонатной системы морской воды.

2. Определение вертикальных притоков CO_2 , температуры и солёности воды

Было применено две процедуры. В первой, основанной на численных экспериментах, выполнявшихся в рамках уже использовавшейся ранее численной модели (Бортковский, 2006), приток находился как произведение коэффициента турбулентного обмена и второй производной соответствующего параметра по вертикали. Оба сомножителя определялись непосредственно в

ходе численных экспериментов. Эта процедура была применена ко всем трем уже названным параметрам структуры.

Вторая процедура состояла в нахождении разделенных разностей температуры и солености в последовательные моменты времени на выбранных уровнях квазиоднородного верхнего слоя океана. Определялись при этом не вертикальные, а полные притоки. Исходные данные брались из сайтов Интернета. Эта процедура не могла быть использована для определения притоков CO_2 из-за отсутствия необходимых данных. Результаты расчетов, выполненных по первой из описанных процедур, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Вертикальные притоки CO_2 ($\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$), температуры ($^\circ\text{C}/\text{с}$) и солености воды ($\text{‰}/\text{с}$) в слое 0—200 м экваториальной зоны Тихого океана при различных фазах Южного колебания

Долгота	Вертикальный приток			
	Фаза	CO_2	T_w	S
90° з. д.	Эль-Ниньо	8,49E-14	-1,45E-06	-2,55E-14
	Норма	-6,70E-13	-9,98E-07	-8,55E-08
	Ла-Нинья	-1,01E-13	-6,97E-07	-4,09E-08
115° з. д.	Эль-Ниньо	1,91E-14	-7,44E-06	7,26E-08
	Норма	4,71E-13	-7,48E-07	-5,02E-08
	Ла-Нинья	3,32E-14	-2,44E-06	-1,44E-14
140° з. д.	Эль-Ниньо	6,66E-14	-1,77E-05	-7,21E-07
	Норма	5,47E-13	-5,09E-06	-4,17E-07
	Ла-Нинья	2,80E-13	-3,96E-06	-1,80E-07

3. Оценка перепада содержания CO_2 вода—воздух в экваториальной зоне Тихого океана при различных фазах Южного колебания

Концентрация растворенного газа на поверхности жидкости всегда равна насыщающей концентрации при данном парциальном давлении газа в воздухе (закон Генри), а насыщающая концентрация уменьшается при повышении температуры. При из-

бранном нами подходе концентрация растворенного газа в толще воды предполагается неизменной. Следовательно, изменения перепада определяются только изменениями значения на поверхности, зависящего от температуры и солености.

В табл. 3 приведены значения температуры воды и концентрации растворенного CO_2 на поверхности океана и на глубине 1 м, а также значения среднего перепада концентрации CO_2 вода—воздух ($\text{г}/\text{см}^3$) и среднего потока CO_2 ($\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$) при нормальных средних условиях, при Эль-Ниньо (повышение температуры поверхности на 4°C) и при Ла-Нинья (понижение температуры на 3°C). Полученные оценки показывают, что повышение температуры на 4°C приводит к увеличению эвазии CO_2 в экваториальной зоне Тихого океана почти на 50 %, а понижение на 3°C — к уменьшению эвазии на 40 %. Эти оценки не согласуются даже по знаку с приведенными выше результатами (Feely et al., 1999).

Таблица 3

Параметры приповерхностного слоя океана в точке 0° ш., 90° з. д. при различных фазах Южного колебания

Параметр	Норма		Эль-Ниньо		Ла-Нинья	
	$z = 0$	$z = 1 \text{ м}$	$z = 0$	$z = 1 \text{ м}$	$z = 0$	$z = 1 \text{ м}$
$T^\circ\text{C}$	24,95	24,97	28,95	28,97	21,95	21,97
$[\text{CO}_2] \text{ г}/\text{см}^3$	$4,118 \cdot 10^{-7}$	$5,017 \cdot 10^{-7}$	$3,704 \cdot 10^{-7}$	$5,017 \cdot 10^{-7}$	$4,477 \cdot 10^{-7}$	$5,017 \cdot 10^{-7}$
Перепад $[\text{CO}_2], \text{ г}/\text{см}^3$	$-8,984 \cdot 10^{-8}$		$-1,312 \cdot 10^{-7}$		$-5,392 \cdot 10^{-8}$	
Поток $[\text{CO}_2], \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	$-4,127 \cdot 10^{-10}$		$-6,027 \cdot 10^{-10}$		$-2,477 \cdot 10^{-10}$	

4. Анализ изменчивости факторов, определяющих газообмен

Что касается разномасштабной изменчивости скорости ветра и температуры, то ее изучение не представляет принципиальной сложности благодаря наличию достаточно длинных рядов данных. Применительно к избранным ключевым районам Тихого

океана такое изучение было выполнено ранее (Бортковский, Егоров, 2003).

Длительные непрерывные измерения концентрации CO_2 в какой-либо фиксированной точке океана, по-видимому, вообще не проводились. Отдельные попытки провести такие измерения (De Grandpre et al., 1997) представляют определенный интерес, но они относятся к прибрежной зоне моря. Таким образом, коротко-периодная изменчивость поля концентрации CO_2 в океане остается до сих пор неизученной, хотя оценки изменчивости перепада и потоков газа известны (Takahashi et al., 2002; Olsen et al., 2004).

Известен ряд попыток установить эмпирические связи параметров карбонатной системы морской воды с температурой и соленостью воды и с помощью таких связей оценить сезонные вариации карбонатной системы (Brewer et al., 1986; Bates et al., 1996; Brewer et al., 1997; Goyet et al., 2000). Однако выполненное нами исследование показало, что стохастические связи между элементами карбонатной системы и гидрологией не универсальны и использовать их для оценки изменений значений этих элементов нельзя. Утверждение, что «в поверхностных слоях океана парциальное давление CO_2 растет при повышении температуры, вследствие дыхания организмов и окисления органики, а уменьшается при понижении температуры и вследствие фотосинтеза и растворения CaCO_3 » (Алекин, Ляхин, 1984), сомнительно в части однозначности влияния температуры.

5. Расчет потоков кислорода и CO_2 в области Эль-Ниньо

Расчеты выполнялись с использованием специально разработанной версии одномерной численной модели (Бортковский, 2006; Бортковский и др., 2007). В этой версии на первом этапе каждой реализации вводятся и фиксируются профили температуры и солености воды, вводятся и профили составляющих течений. Эти профили, соответствующие средним климатическим условиям, построены по данным Levitus, Boyer (1994) и сайта <http://www.cdc.noaa.gov/>. Биохимические процессы учитывают-

ся включением в уравнения газопереноса величины первичной продукции (Falkovski et al., 1998). При реализации этого этапа вычислений определяются и непрерывно меняются значения характеристик турбулентности, а также содержания газа и газопереноса в верхнем 200-метровом слое океана. При этом происходит постепенная адаптация этих характеристик к заданным климатическим условиям.

После достижения системой квазистационарного состояния, которое отмечается критерием, включающим скорость изменения содержания кислорода и CO_2 в приповерхностном слое воды, начинается второй этап численной реализации. От первой он, как и другие этапы, отличается тем, что задаются и фиксируются только профили температуры и солёности, соответствующие возмущенным условиям (условиям первого и последующих месяцев, входящих в интервал конкретного явления Эль-Ниньо либо Ла-Нинья). Из решения системы уравнений находятся не только профили содержания газа, но и профили составляющих скорости течения и кинетической энергии турбулентности. Начальными условиями для решения на этом и последующих этапах реализации являются результаты, полученные на предыдущем этапе. Процесс заканчивался вычислениями для последнего месяца явления.

6. Результаты численных экспериментов

Потоки газов через поверхность океана при Эль-Ниньо 1997/98 г. и Ла-Нинья 1988 г., а также при нормальных условиях на экваторе приведены в табл.4. Потоки определялись по формуле $F_i = -K_z dC_i / dz$, где K_z — коэффициент турбулентного обмена, средний для слоя от поверхности до глубины 140 см; dC_i / dz — средняя производная концентрации газа в этом слое. Найдено, что вопреки сложившимся представлениям эвазия CO_2 происходит только в точке, расположенной на долготе 90° з.; западнее, на долготе 115 и 140° з., происходит инвазия этого газа.

При Эль-Ниньо эвазия CO_2 на экваторе на долготе 90° з. заметно возрастает, а в точках, расположенных западнее, инвазия

сменяется эвазией через один-два месяца после начала явления. Поглощение кислорода океаном при Эль-Ниньо меняется мало.

В условиях Ла-Нинья эвазия CO_2 в самой восточной точке (90° з. д.) возрастает, а в точках, расположенных западнее, сначала (в июне—июле) уменьшается инвазия, которая в августе сменяется эвазией. Поток кислорода уменьшается во всей экваториальной зоне; это уменьшение, связанное с понижением температуры, было объяснено выше.

Таблица 4

Газообмен океан—атмосфера ($\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$) в условиях Эль-Ниньо 1997/98 г., Ла-Нинья 1988 г. и при нормальных условиях

λ° з. д.	Эль-Ниньо 1997/98 г.				
	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь
	CO_2				
90	-2,72E-8	-2,30E-8	-2,46E-8	-2,61E-8	-2,72E-8
115	1,86E-9	5,97E-11	-1,19E-9	-2,28E-9	-3,24E-9
140	2,23E-10	-1,42E-9	-4,35E-9	-5,74E-9	-7,74E-9
	Кислород				
90	1,32E-7	1,20E-7	1,23E-7	1,29E-7	1,33E-7
115	2,28E-7	2,29E-7	2,31E-7	2,28E-7	2,32E-7
140	5,67E-8	6,69E-8	7,86E-8	9,36E-8	1,078E-7

λ° з. д.	Норма	Ла-Нинья 1988 г.		
		Июнь	Июль	Август
		CO_2		
90	-1,88E-8	-2,24E-8	-2,10E-8	-2,56E-8
115	7,11E-9	5,43E-9	1,14E-9	-9,66E-10
140	6,43E-9	5,80E-9	2,39E-9	-2,57E-8
		Кислород		
90	1,21E-7	3,68E-8	3,61E-8	4,26E-8
115	2,34E-7	1,37E-7	1,35E-7	1,46E-7
140	5,72E-8	1,05E-7	1,16E-7	-1,09E-7

7. Горизонтальные притоки растворенных газов: адвективный и горизонтальный турбулентный обмен

Можно бы было предположить, что причиной расхождений между модельным воспроизведением и наблюдаемым ходом содержания газа, обнаруженных при численных экспериментах, является одномерность использованной модели — в ней не учитывается горизонтальная неоднородность структуры океана. С горизонтальной неоднородностью связаны адвективный и горизонтальный турбулентный притоки. Оценки этих членов применительно к переносу растворенных в океане газов до сих пор в литературе не встречались. Нами сделана попытка получить такие оценки, прежде всего, для области Эль-Ниньо, в которой горизонтальная неоднородность поля температуры воды явно выражена.

Полный адвективный приток в предположении о горизонтальной однородности поля скорости находится как скалярная сумма:

$$Adv = -(U\partial C / \partial x + V\partial C / \partial y).$$

Для расчетов адвективных притоков были определены профили CO_2 в вершинах трех четырехградусных квадратов с центрами, расположенными на экваторе на долготе $90, 115, 140^\circ$ з. Для расчетов адвекции в точке с координатами 0° ш., 90° з. д. профили CO_2 определялись в вершинах квадрата с координатами: 2° с. ш., 88° з. д.; 2° с. ш., 92° з. д.; 2° ю. ш., 92° з. д.; 2° ю. ш., 88° з. д. Составляющие скорости течения U и V определялись только для центра квадрата с использованием данных сайта <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html>.

По аналогичной схеме проводились расчеты адвекции для других указанных выше точек, расположенных на экваторе. Результаты расчетов адвективных притоков CO_2 , температуры воды (T_w) и соли (S) приведены в табл. 5. В соответствии с этими результатами адвекция CO_2 изменяется в пределах от $-1,42\text{E-}15$ до $+4,4\text{E-}14$ г/(см² · с) при Эль-Ниньо и от $-1,77\text{E-}13$ до $+5,11\text{E-}15$ г/(см² · с) при Ла-Нинья.

Таблица 5

Адвективные притоки CO_2 ($\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$), температуры T_w ($^\circ\text{C}/\text{с}$), солености S ($\text{‰}/\text{с}$) в слое 0—200 м экваториальной зоны Тихого океана в условиях Эль-Ниньо, Ла-Нинья и при нормальных условиях

λ° з. д.	Фаза	CO_2	T_w	S
90	Эль-Ниньо	-1,42E-15	1,66E-07	4,47E-09
	Норма	-4,27E-15	8,03E-08	-2,93E-08
	Ла-Нинья	5,11E-15	1,63E-07	-5,00E-08
115	Эль-Ниньо	-3,54E-14	2,35E-07	1,24E-08
	Норма	-8,25E-15	4,45E-07	1,02E-08
	Ла-Нинья	-1,09E-14	-4,54E-09	-1,10E-08
140	Эль-Ниньо	4,40E-14	4,68E-08	-1,18E-08
	Норма	-1,62E-13	7,20E-07	4,25E-08
	Ла-Нинья	-1,77E-13	4,68E-08	1,90E-07

Отношение суммы адвективного и горизонтального притоков CO_2 к вертикальному притоку (табл. 6) составляет по модулю на долготе 90° з. от 0,006 (норма) до 0,05 (Ла-Нинья), на долготе

Таблица 6

Отношение адвективного и горизонтального притоков CO_2 и их суммы к вертикальному притоку

λ° з. д.	Фаза	Отношение к вертикальному притоку		
		адвекции	гориз. турбул.	суммы
90	Эль-Ниньо	-1,67E-02	2,03E-04	-1,65E-02
	Норма	-6,37E-03	4,81E-05	-6,32E-03
	Ла-Нинья	-5,06E-02	5,62E-03	-5,00E-02
115	Эль-Ниньо	-1,85E+00	5,11E-04	-1,85E+00
	Норма	-1,75E-02	3,63E-02	1,88E-02
	Ла-Нинья	-3,28E-01	-8,25E-03	-3,36E-1
140	Эль-Ниньо	6,61E-01	-6,67E-04	6,57E-01
	Норма	-2,96E-01	2,82E-02	-2,93E-01
	Ла-Нинья	-6,32E-01	1,54E+00	9,08E-01

115° з. — от 0,018 (норма) до 1,85 (Эль-Ниньо), на долготе 140° з. — от 0,29 (норма) до 0,91 (Ла-Нинья). Таким образом, установлено, что роль горизонтальных притоков в переносе CO₂ возрастает по мере удаления на запад от Южно-Американского материка. Однако рассмотренное отношение превысило единицу только при явлении Эль-Ниньо и на долготе 115° з. В остальных точках и при различных фазах Южного колебания можно считать установленной применимость одномерной модели к описанию переноса CO₂ в верхнем слое океана.

Кроме адвективного, горизонтальный приток включает и турбулентный член $A_l(\partial^2 C / \partial x^2 + \partial^2 C / \partial y^2)$. Коэффициент горизонтального турбулентного обмена A_l зависит от характерного пространственного масштаба. Обычно предполагается, что этот масштаб определяется шагом сетки, на которой заданы параметры океанических полей. В современных электронных атласах (Levitus, Boyer, 1994) и архивах принят шаг 1°, что для экваториальной зоны близко к 100 км. При пространственном масштабе 100 км Р. В. Озмидовым рекомендовано принять $A_l \approx 10^7 \text{ см}^2/\text{с}$ (http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/, Океанология, 1978).

Расчеты горизонтальных турбулентных притоков показали, что для всех рассматриваемых параметров они на 1—2 порядка меньше адвективных притоков. Для точек экватора, расположенных в зоне 90—115° з. д., наименьшими из рассчитанных притоков CO₂ (по абсолютному значению) являются горизонтальные турбулентные притоки, наибольшими — вертикальные притоки, которые в большинстве рассмотренных случаев на 1—2 порядка превосходят адвекцию. Однако на 140° з. д. вертикальные притоки превышают адвекцию лишь в 1,5—10 раз.

Были построены вертикальные профили притоков газов, найденных как производные вертикальных турбулентных потоков; последние были вычислены на основе описанной выше одномерной численной модели верхнего слоя океана. Эти притоки оказались существенно больше, чем притоки, связанные с адвекцией и с горизонтальным турбулентным обменом. В качестве примера приведены профили притоков в точке с координатами 0° ш., 90° з. д. (рис. 3).

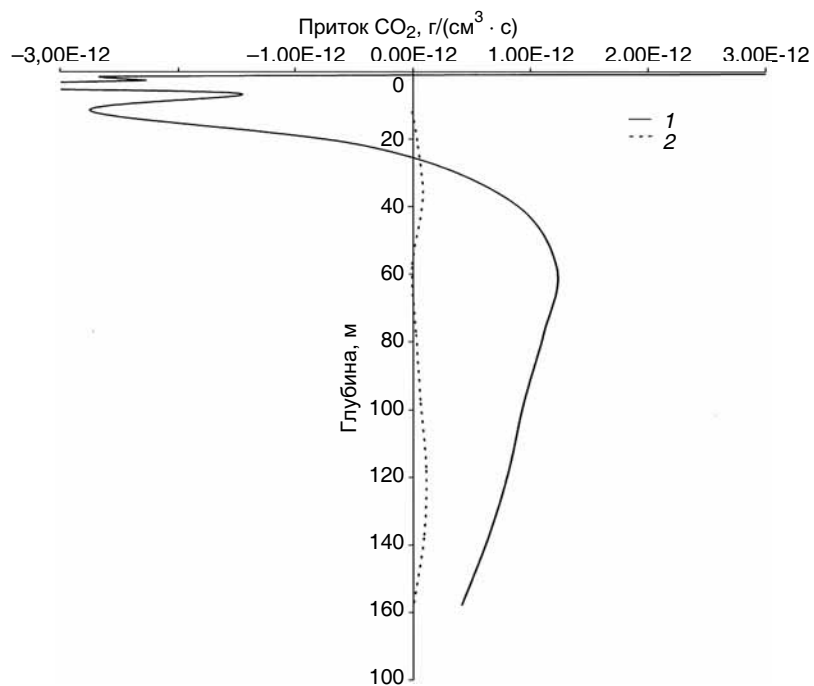


Рис. 3. Профили притоков CO_2 в экваториальной зоне Тихого океана.
 1 — притоки, найденные как производные вертикальных турбулентных потоков по z ; 2 — адвективные притоки.

Однако вывод о преобладании вертикальных притоков в газопереносе, относящийся к области Эль-Ниньо, нельзя считать окончательным — исследование этого вопроса необходимо продолжить.

8. Притоки CO_2 , температуры и соли в районах Гольфстрима и Куроисио

Оценки адвективных, а также горизонтальных и вертикальных притоков были выполнены для точки, расположенной в области Гольфстрима ($37,5^\circ$ с. ш., 70° з. д.), и точки, расположенной

в области течения Куроиси (40° с. ш., 155° в. д.). Расчеты были выполнены по климатическим данным, взятым из источников, указанных выше. Результаты расчетов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Адвективный и вертикальный притоки в верхнем 200-метровом слое в области Гольфстрима и Куроиси

Приток	Область	CO ₂	T _w	S
Адвективный	Гольфстрим	-8,42E-15	-4,33E-07	-1,80E-07
	Куроиси	1,64E-15	-3,19E-08	-1,78E-08
Вертикальный	Гольфстрим	1,64E-13	1,14E-06	2,35E-08
	Куроиси	-4,24E-13	1,63E-06	-6,25E-08

Из данных табл. 7, так же как и из результатов, представленных выше, следует сделать вывод о том, что в количественном отношении наибольший вклад принадлежит вертикальному притоку, который на 1—2 порядка превышает адвективный приток. Горизонтальный турбулентный приток на 2—4 порядка меньше вертикального. Следовательно, применение одномерной модели для оценок газообмена между атмосферой и океаном в указанных районах Мирового океана можно считать обоснованным. Этот же вывод справедлив в отношении переноса тепла и соли.

Заключение

Показано, что изменение температуры и солености воды, вызванное явлениями Эль-Ниньо и Ла-Нинья, приводит к существенным изменениям эвазии CO₂ в экваториальной зоне восточной части Тихого океана.

Систематизированы и проанализированы данные измерений, характеризующие статистическую структуру поля концентрации CO₂ и кислорода в верхнем слое океана.

Выполнены численные эксперименты, и по их результатам получены оценки притоков кислорода и CO₂ в экваториальной

зоне Тихого океана. Установлено, что область выраженной эвазии CO_2 при средних, невозмущенных условиях ограничена восточной частью этой зоны. В условиях Эль-Ниньо эвазия газа в этой области заметно возрастает и начинает проявляться и в западной ее части.

Изменения потоков CO_2 , связанные с проявлениями Южного колебания, следует учитывать при оценке глобального баланса этого газа.

Оценено влияние горизонтальной неоднородности структуры экваториальной зоны на применимость одномерной численной модели для воспроизведения газопереноса.

Установлено, что как в экваториальной зоне Тихого океана, так и в областях Гольфстрима и Куроисио притоки CO_2 , обусловленные вертикальным турбулентным обменом, значительно превосходят по модулю притоки за счет адвекции и горизонтального турбулентного обмена. То же относится к переносу тепла и соли.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-00874) и Института океанологии РАН (х.д. № 86).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алекин О. А., Ляхин Ю. И. (1984). Химия океана. — Л.: Гидрометеоздат.

Бортковский Р. С. (2006). К оценке среднего обмена кислородом и CO_2 в ключевых районах океана. — Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 42, № 2, с. 250—257.

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-м веке. — Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 43, № 3, 313—319.

Бортковский Р. С., Егоров Б. Н. (2003). Об учете статистической структуры скорости ветра при определении энерго- и газообмена между океаном и атмосферой. — Метеорология и гидрология, № 2, с. 46—53.

Океанология. Физика океана. Т.1 (1978). — М.: Наука.

Bates, N. R., Michaels, A. F. & Knap, A. H. (1996). Seasonal and interannual variability of the oceanic carbon dioxide system at the U.S. JGOFS Bermuda Atlantic Time-Series Site. — Deep-Sea Res., V. 43, p. 347—383.

Brewer P. G., Bradshaw A. I., Shafer D. K., Williams R. T. (1986). *In: The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis* / Eds. J. R. Trabalka, & D. E. Reichle. — Springer, New York, p. 348—370.

Brewer P. G., Goyet C., Friedrich G. (1997). Direct observation of the oceanic CO₂ increase revisited. — *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, V. 94, No. 16, p. 8308—8313.

D'Allesio, S. J. D., K. Abdella, and N. A. McFarlane (1998). A new second-order turbulence closure scheme for modeling the ocean mixed layer. — *J. Phys. Oceanogr.*, 28, No. 8, p. 1624—1641.

De Grandpre M. D. et al. (1997). Simultaneous mooring-based measurements of seawater CO₂ and O₂ off Cape Hatteras, North Carolina. — *Limnol. and Oceanogr.*, V. 42 (1), p. 21—28.

Falkowski P. G., R. T. Barber, V. Smetacek (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. — *Science*, V. 281, Chemistry and Biology of the Oceans, p. 200—206.

Feely, R. A., R. Wanninkhof, T. Takahashi, P. (1999). Tans, Influence of El Nino on the equatorial Pacific contribution to atmospheric CO₂ accumulation. — *Nature*, 398, 597.

Goyet C., Healy R., Ryan J. (2000). Global distribution of total inorganic carbon and total alkalinity below the deepest winter mixed layer depths. ORNL/CDIAC-127. — Oak Ridge, Tenn. — 28 p.

Olsen A., Abdirahman A. M., Stuart-Menteth A. C. et al. (2004). Diurnal variations of surface ocean pCO₂ and sea-air CO₂ flux evaluated using remotely sensed data. — *Geophys. Res. Lett.*, V. 31, L20304. doi:10.1029/2004Gl020583.

Wanninkhof R. (1992). Relationships between wind speed and gas exchange over the ocean. — *J. Geophys. Res.*, V. 97, No. C5, p. 7373—7382.

Levitus S., Boyer T. P. (1994). *World Ocean Atlas*, V. 1, 2. — Washington, D. C. — 186 p.

Takahashi T., Feely R.A., Weiss R. et al. (1997). Global air-sea flux of CO₂: an estimate based on measurements of sea-air pCO₂ difference. — *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, V. 94, p. 8292—8299.

УДК 551.510.04

**К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ
МЕХАНИЗМОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ
ТРАНСФОРМАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
В АТМОСФЕРЕ**

Е. В. Мекрюкова, Е. Л. Генихович

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

Поступила в редакцию 25.02.2010
Поступила после доработки 16.03.2010

1. Введение

Расчет значений концентраций загрязняющих веществ в определенный момент времени предполагает комплексное решение задачи физико-химической трансформации веществ в атмосфере. В ряде работ, в том числе в работе Young et al. (1997), описаны способы упрощения системы уравнений атмосферной диффузии и подключения к этой системе модулей для решения задачи атмосферной фотохимии.

В работах Daescu et al. (2003), Damian et al. (2002), Sandu et al. (2003) описаны принципы математического моделирования фотохимических систем и предложено несколько подходов к решению этой задачи, в том числе метод препроцессинга — составления предварительного описания системы в специальных директивах для дальнейшей обработки этого описания утилитой, генерирующей на его основе готовый программный код.

В целом ряде публикаций, в частности в докладе Mathur et al. (2004) и отчетах Carter, Luo et al., проведено сопоставление модельных расчетных данных с данными экспериментов в смоговых камерах, специальных установках или, как в работе Dennis et al. (2009), с данными натуральных экспериментов.

В зависимости от масштаба рассматриваемых процессов математические модели для расчета концентраций могут иметь

различную степень детализации, в них могут использоваться различные по сложности химические механизмы.

Многие источники информации о химических механизмах были проанализированы в работе Кароля, Озолина (1979). Анализу газового состава атмосферы с учетом влияния этих химических механизмов посвящена монография Кароля и др. (1983).

В настоящей работе предлагается подход к оценке эффективности химических механизмов, предназначенных для моделирования фотохимических процессов в атмосфере, который основан на сопоставлении результатов расчетов с данными экспериментов в смоговых камерах с использованием метрики, обычно применяемой для оценки качества моделей атмосферной диффузии (Olesen, 1995).

2. Используемые химические механизмы

Понятие «химический механизм» нередко используется для обозначения совокупности стадий сложных реакций или же для идентификации физических процессов, составляющих сущность химического превращения в случае простой реакции. В настоящей работе под химическим механизмом подразумеваются набор химических реакций, описывающих атмосферные циклы различных веществ, а также система дифференциальных уравнений, соответствующая указанному набору реакций.

Из-за большого количества соединений, выбрасываемых в атмосферу, а также большого количества формирующихся в загрязненной тропосфере продуктов реакций и большого числа самих реакций модельные химические механизмы являются в значительной степени упрощенными и приближенными. Кроме того, ввиду ограниченности наших знаний (например, отсутствия данных о скорости протекания некоторых реакций и т. п.) эти механизмы строятся на основе некоторых предположений и экстраполяций, необходимых для представления играющих важную роль процессов, информация о которых недоступна. Каждый разработчик механизма применяет свои подходы к упрощению механизма, допущения и методы экстраполяции (Carter et al., 1999).

В мировой практике моделирования физико-химических трансформаций довольно часто используются различные редакции химических механизмов CBM4 (Carbon Bond Mechanism) (Gery et al., 1989) и SAPRC (Statewide Air Pollution Research Center) (Lurmann et al., 1991). CBM4 включает 83 реакции для 29 веществ, SAPRC-99 — 187 реакций для 65 веществ и более детально отражает химические процессы с участием органических веществ. Результаты сопоставления этих механизмов обсуждаются в работе Luecken (2008).

В настоящей работе к этим двум механизмам был добавлен еще один, обозначенный MaxMod (58 реакций с участием 36 веществ), который, по сути дела, заимствован из достаточно ранней публикации Лютера, Питерса (1986) и разработан на основе материалов работ Chameides (1978) и Kitada, Peters (1980). Можно предположить, что значения включенных в этот механизм констант скорости реакций к настоящему времени устарели, так что его эффективность заведомо не должна быть слишком высокой.

3. Методика оценки химических механизмов

Программная реализация математических моделей на основе указанных химических механизмов проводилась при помощи кинетического препроцессора (КРР). КРР представляет собой пакет, предназначенный для облегчения процесса компьютерного моделирования задач химической кинетики, а именно составления системы дифференциальных уравнений и ее интегрирования. Утилита kpp «переводит» описание химического механизма в виде стехиометрических уравнений в программный код на языках C или FORTRAN90 (по выбору пользователя). Принципы работы КРР и область его применения описаны в работах Daescu et al. (2003), Damian et al. (2002) и Sandu et al. (2003). Система жестких дифференциальных уравнений решалась методом Розенброка с автоматическим выбором шага. При этом использовалась стандартная процедура, включенная в пакет программ КРР.

В результате проведения численных экспериментов были сформированы массивы концентраций озона, NO и NO₂. Затем

модельные данные сравнивались с данными экспериментов, проведенных в смоговой камере в Калифорнийском университете (Carter et al., 1999). Модельные состояния фиксировались для каждого из тех моментов времени, в которые были проведены измерения, и сопоставлялись с результатами измерений. За начальные состояния O_3 , NO и NO_2 при проведении численных экспериментов принимались значения концентраций этих веществ на первом временном шаге измерений. Концентрации других веществ в начальный момент времени принимались равными нулю.

Из всего массива данных (пять различных камер) для анализа были взяты данные экспериментов в камере ИТС (Indoor Teflon Chamber). Это камера со съёмными тефлоновыми пакетами в алюминиевых рамах и лампами подсветки на всех сторонах. Ее объем составляет примерно 6000 л. Эксперименты в ней проводятся обычно при комнатной температуре и относительной влажности воздуха 50 % (Carter, Luo et al.). Поскольку информация о характеристиках подсветки отсутствовала, соответствующие условиям проведения экспериментов скорости фотолиза определялись по результатам измерения концентраций на первом временном шаге и для последующих шагов сохранялись постоянными.

В базе-источнике, представляющей собой набор архивов, содержащих текстовые файлы-отчеты, находится информация о более чем 300 экспериментах, проведенных в камере ИТС до 1993 г. Из этих данных были выбраны только те эксперименты, в которых измеренные концентрации веществ не были отрицательными (наличие отрицательных концентраций в массиве экспериментальных данных может быть связано со сбоями в работе установки). Затем в оставшихся рядах данных были «отброшены» значения концентраций менее $1e-05$.

По результатам расчетов были построены функции распределения $F(C_{cal}/C_{meas})$ отношений концентраций, рассчитанных по модели (C_{cal}), к соответствующим измеренным концентрациям (C_{meas}) (для O_3 , NO и NO_2 и трех химических механизмов: CBM4, SAPRC-99, MaxMod). Пример полученной функции распределения приведен на рис. 1.

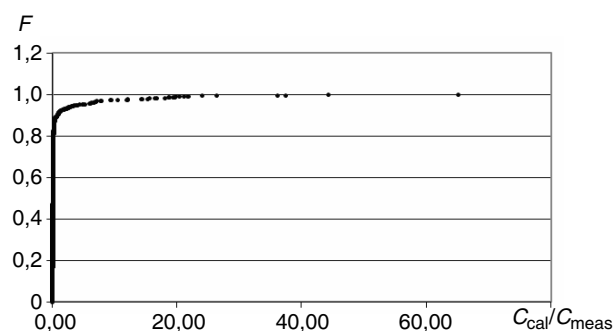


Рис. 1. Функция распределения отношения концентраций озона, полученных при моделировании с использованием механизма MaxMod и в ходе проведения экспериментов в смоговой камере.

Для оценки согласия между результатами расчетов и экспериментами по рассматриваемым примесям в работе используется параметр $FA2$, представляющий собой долю случаев (от общего объема выборки), в которых расчетная концентрация C_{cal} совпадает с измеренной концентрацией C_{meas} после умножения на коэффициент a , удовлетворяющий неравенству $0,5 \leq a \leq 2$. Значение $FA2$ определяется по очевидной формуле: $FA2 = F(2) - F(0,5)$, где через F , как отмечено выше, обозначена функция распределения отношений соответствующих концентраций. Результаты оценки химических механизмов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметра $FA2$ (%) для рассмотренных трех моделей и трех примесей

Примесь	Модель		
	MaxMod	CBM4	SAPRC-99
O ₃	4,15	71,99	68,05
NO	18,53	30,53	35,44
NO ₂	83,26	42,68	50,04

Наиболее «удачной» с точки зрения моделирования концентраций всех трех веществ оказалась модель SAPRC-99 (68,05 % выборки для O_3 , 35,44 % для NO и 50,04 % для NO_2). Наименее «правдоподобный» результат был получен при использовании плохо сбалансированной модели MaxMod (4,15 % выборки для O_3 , 18,53 % для NO и 83,26 % для NO_2).

Если учесть, что сравнение проводилось с экспериментальными данными, полученными группой разработчиков модели SAPRC-99, и что эта же модель при сравнении с экспериментами оказалась наиболее эффективной, то нельзя исключить возможность того, что при работе с другими экспериментальными данными результат оценки может измениться. Кроме того, следует заметить, что при выборе механизма для задачи моделирования концентраций веществ, отличных от O_3 , NO и NO_2 , придется проводить новый анализ.

Выбор и оценка качества химического механизма — очень специфичная задача в каждом отдельном случае. Особенно сложно оценивать механизм при необходимости моделирования больших наборов различных примесей и загрязнителей, что требуется, например, при моделировании загрязнения атмосферного воздуха в городах. Тем перспективнее может оказаться подход, основанный на сопоставлении эффективности различных химических механизмов путем их тестирования с использованием единых баз данных лабораторных и/или натуральных экспериментов и с применением предлагаемой в данной работе «метрики». Соответствующий анализ не требует от модельера глубоких знаний в области химической кинетики и подробностей протекания физико-химических процессов, но при этом предоставляет возможность оценить целесообразность использования различных химических механизмов при разработке так называемых химических транспортных моделей (т. е. моделей атмосферного переноса и диффузии примесей с учетом их физико-химических преобразований). Применение изложенного подхода облегчает также выбор химических моделей такого уровня сложности, который в некотором смысле «адекватен» уровню детализации процессов, предусмотренному в химической транспортной модели, и требованиям к номенклатуре примесей, концентрации которых должны быть получены в результате моделирования.

4. Заключение

Приведенные в настоящей работе результаты позволяют сделать вывод о том, что предлагаемый в ней подход к оценке эффективности различных химических механизмов при моделировании процессов трансформации загрязняющих веществ в атмосфере является перспективным. При дальнейшем развитии данной работы предполагается расширить используемую для тестирования базу данных, включив в нее информацию, которая была получена в других экспериментальных исследованиях, а затем с ее использованием провести сопоставление вышеупомянутых и еще нескольких химических моделей, разрабатываемых в настоящее время. Можно надеяться, что полученные при этом результаты окажутся полезными для выявления и подтверждения целесообразности выбора того или другого механизма при решении конкретных задач атмосферной химии, и в частности для поиска простых и достаточно точных химических механизмов для включения в инженерные модели, применяемые при массовых расчетах загрязнения воздуха, которые проводятся с целью разработки мероприятий по охране атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кароль И. Л., Озолин Ю. Э. (1979). Фотохимические реакции с участием озона в стратосфере и их параметры. — М.: Изд-во ВНИИГМИ—МЦД. — 41 с.

Кароль И. Л., Розанов В. В., Тимофеев Ю. М. (1983). Газовые примеси в атмосфере. — Л.: Гидрометеоздат. — 192 с.

Лютер С. Дж., Питерс Л. К. (1986). Возможная роль гетерогенных процессов на аэрозольных частицах в химических превращениях CH_4 и CO в тропосфере. — В сб.: Гетерогенная химия атмосферы / Под ред. Д. Р. Шрайера. — Л.: Гидрометеоздат, с. 474 — 492.

Carter W. P. L., Luo D., Malkina I. L. and D. Fitz. Environmental chamber data base for evaluating oxidant mechanisms: backing document and data base description. <http://www.cert.ucr.edu/~carter>

Carter W. P. L., Crosley D. R., Golden D. M. et al. (1999). Atmospheric chemistry and chemical mechanisms. Draft as of 4/11/99. <http://www.narsto.org/files/files/AssessChem.pdf>

Chameides W. L. (1978). The effect of anthropogenic carbon monoxide on the methane budget of the troposphere. *In: Proc. Fourth Joint Conference on Remote Sensing of Environmental Pollutants.* — Amer. Chem. Soc.

Daescu D., Sandu A. and G. R. Carmichael (2003). Direct and adjoint sensitivity analysis of chemical kinetic systems with KPP: II. Validation and numerical experiments. — *Atm. Env.*, V. 37, p. 5097—5114.

Damian V., Sandu A., Damian M. et al. (2002). The Kinetic PreProcessor KPP — a software environment for solving chemical kinetics. — *Computers and Chemical Engineering*, V. 26, No. 11, p. 1567—1579.

Dennis R., Fox T., Fuentes M. et al. (2009). On the evaluation of regional-scale photochemical air quality modeling systems, http://aqmeii.jrc.ec.europa.eu/doc/mod_eval_report_24_02_09.pdf

Gery M., Whitten G., Killus J. and Dodge (1989). A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. — *J. Geophys. Res.*, V. 94, p. 925—956.

Kitada T. and L. K. Peters (1980). A model of CO-CH₄ global transport/chemistry. I. Chemistry model. — *J. Japan Soc. Air Poll.*, 15, p. 91—108.

Luecken D. (2008). Comparison of atmospheric chemical mechanisms for regulatory and research applications, simulation and assessment of chemical processes in a multiphase environment. — Springer, Netherlands, p. 95—106.

Lurmann F. W., M. Gery, and W. P. L. Carter (1991). Implementation of the 1990 SAPRC chemical mechanism in the urban airshed model. Final Report to the California South Coast Air Quality Management District, Sonoma Technology, Inc. Report STI-99290-1164-FR, Santa Rosa, CA.

Mathur R., Roselle S., Pouliot G., and G. Sarwar (2004). Diagnostic analysis of the three-dimensional sulfur distributions over the Eastern United States using CMAQ and Measurements from the 2004 ICARTT Field Experiment, Air Pollution Modeling and Its Application XIX. — Springer, p. 496—504. www.springerlink.com/content/xh2j774420233442/

Olesen H. R. (1995). Data sets and protocol for model validation. Workshop on Operational Short-range Atmospheric Dispersion Models for Environmental Impact Assessment in Europe, Mol, Belgium. Nov. 1994. — *Int. J. Environment and Pollution*, V. 5, No. 4—6, p. 693—701.

Sandu A., Daescu D., and G. R. Carmichael (2003). Direct and adjoint sensitivity analysis of chemical kinetic systems with KPP: I. Theory and Software Tools. — *Atm. Env.*, V. 37, p. 5083—5096.

Young A. T., Betterton E. A. and L. Saldivar de Rueda (1997). Photochemical box model for Mexico City. — *Atmospfera*, 10, p. 161—178.

УДК 551.510.42

**ПРОГНОЗ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРОДАХ ПРОМЫШЛЕННОГО
РЕГИОНА**

*Т. В. Костарева¹, В. И. Кириллова², В. Д. Николаев²,
Л. Р. Сонькин²*

¹ Пермский ЦГМС
614030 Пермь, ул. Ново-Гайвинская, д. 70
e-mail: nmu@perm.ru

² Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
e-mail: polfor@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 15.02.2010

Для решения проблемы защиты атмосферы от загрязнения и соответственно защиты здоровья населения в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) большой интерес представляет задача прогнозирования (и предотвращения) экстремально высоких уровней загрязнения воздуха в городах (ЭВУЗВ), с которыми связаны наиболее неблагоприятные для населения и окружающей среды эпизоды. Здесь идет речь об опасных случаях, которые наблюдаются редко и могут быть приравнены к стихийным бедствиям, таким как наводнения, цунами, ураганы и др.

В данной работе решается задача прогноза ЭВУЗВ в городах промышленного региона. В таких регионах предприятия располагаются и загрязняют атмосферу в группе городов. Рассматривается возможность прогноза загрязнения воздуха в целом по промышленному региону с целью защиты атмосферы при НМУ в масштабе региона и в каждом из городов данного региона, в частности и при отсутствии специально разработанных схем прогноза ЭВУЗВ. Для решения такой задачи проанализированы материалы пяти городов Уральского региона — Перми, Екатеринбурга, Березников, Соликамска, Губахи.

Для выделения случаев ЭВУЗВ используется интегральный показатель загрязнения воздуха в городе — параметр P (Информационный бюллетень, 2008; Руководство, 1993), который является частотной характеристикой и представляет собой отношение числа случаев существенно повышенных концентраций примесей в воздухе, измеренных в течение дня (превышающих среднесезонную концентрацию данной примеси на данном стационарном посту $q_{\text{ср}}$ более чем в 1,5 раза), к общему числу измерений в течение этого же дня. В среднем $P = 0,2$. В качестве ЭВУЗВ принимается 2 % случаев с наиболее высокими уровнями загрязнения (наибольшими значениями параметра P). Чаще всего к ЭВУЗВ относятся случаи с $P > 0,5$, однако для разных городов этот критерий различается. В рассматриваемых городах с учетом 2 %-ной повторяемости к ЭВУЗВ относятся случаи со следующими значениями P : в Перми — $P \geq 0,45$ зимой и $P \geq 0,42$ летом; в Екатеринбурге — $P \geq 0,6$ зимой и $P \geq 0,4$ летом; в Березниках — и зимой, и летом $P \geq 0,42$; в Соликамске — зимой $P \geq 0,4$ и летом $P \geq 0,38$, в Губахе — зимой $P \geq 0,5$ и летом $P \geq 0,45$.

Ранее было показано, что в дни с большими значениями параметра P в городах реально имеет место неблагоприятное состояние воздушного бассейна (Кириллова, 1998; Сонькин, 1991). В первую очередь, следует отметить тесную корреляцию между P и средней по городу концентрацией (коэффициент корреляции превышает 0,9, если параметр P рассчитывается для данной примеси). Выявилась связь между жалобами населения на загрязнение воздуха и значениями параметра P . Установлено также, что наибольшие значения концентраций в воздухе специфических примесей в основном наблюдались при очень больших значениях параметра P (Кириллова, 1998).

В процессе анализа материалов указанных выше пяти уральских городов достаточно определенно выявилось, что в дни с большими значениями P (в дни с ЭВУЗВ) в городах возникают опасные условия. В соответствии с процедурой расчета параметра P в дни с ЭВУЗВ измеренные концентрации примесей на стационарных постах в городе в большинстве случаев превышают $1,5q_{\text{ср}}$, однако вследствие их значительного разброса наибольшие

концентрации достигают очень высоких значений. Так, по данным для этих городов наибольшие концентрации диоксида азота, диоксида серы, оксида углерода превышают в такие дни $1,5q_{\text{ср}}$ в 7—9 раз и более, сероводорода, формальдегида, соляной кислоты, оксида азота — в 30—50 раз. Соответственно в дни с ЭВУЗВ концентрации вредных веществ в воздухе значительно превышают ПДК. В первую очередь, это касается специфических примесей (концентрации сероводорода в Перми и Соликамске при ЭВУЗВ превышают ПДК в 8—10 раз). Концентрации других измеряемых примесей в указанных выше городах превышали ПДК в такие дни в 3—5 раз. Существенно, что во всех без исключения отобранных случаях с ЭВУЗВ (101 случай в пяти городах) концентрации примесей в воздухе превышали ПДК.

Следует отметить, что известные случаи катастрофического загрязнения воздуха характеризовались ростом концентраций вредных веществ на всей территории города (Barret, 1962; Martin, 1959).

В течение последних лет выполнен цикл работ по анализу и прогнозу ЭВУЗВ (Костарева, Сонькин, 2005; Система прогноза, 2004; Сонькин, Николаев, Кириллова, 2003; Сонькин, Николаев, 1993). Способ анализа метеорологических (синоптических) условий формирования ЭВУЗВ имеет свои особенности, связанные с тем, что данное явление наблюдается крайне редко — 2—3 раза в течение сезона, поэтому для исследования таких условий в конкретном городе очень мало данных. Тем не менее выяснилось (Сонькин, 1991; Сонькин, Николаев, 1993), что условия формирования ЭВУЗВ в различных городах близки, поэтому имеется возможность исследования данного процесса с использованием материалов многих городов.

Были рассмотрены материалы более 40 городов европейской части России и Урала (Система прогноза, 2004; Сонькин, Николаев, 1993). В результате такого анализа удалось установить наиболее неблагоприятные синоптические ситуации и некоторые особенности синоптических процессов, способствующие формированию ЭВУЗВ в городах на указанной территории. С учетом наиболее неблагоприятных синоптических ситуаций и выявленных особенностей, способствующих увеличению загрязнения

воздуха, сформулированы правила для прогноза ЭВУЗВ, которые хорошо оправдываются в ряде городов европейской части России и Уральского региона (Информационный бюллетень, 2007, 2008).

Для разработки синоптико-статистических схем прогноза ЭВУЗВ установлен синоптический предиктор Sn . Поскольку существующий способ установления Sn (Руководство, 1993) в случае ЭВУЗВ неприменим (вследствие малого числа случаев ЭВУЗВ в отдельном городе), здесь Sn включает влияние четырех факторов, каждый из которых выражается в баллах:

 синоптическая ситуация текущего дня (B_T),

 синоптическая ситуация предшествующего дня ($B_{п}$),

 неблагоприятные особенности синоптического процесса ($B_{ос}$),

 характер преобразования синоптического процесса ($B_{пр}$).

Предиктор Sn устанавливается для каждого города отдельно для холодного и теплого периода года. Он оценивается суммой баллов: $Sn = B_T + B_{п} + B_{ос} + B_{пр}$.

Способ расчета Sn для случая ЭВУЗВ приводится в работе Система прогноза (2004) и работе Сонькина и др. (2003). Оценка вклада (в баллах) каждой составляющей, входящей в Sn , определяется на основе синоптического анализа материалов для каждого города. Соответственно и прогностические схемы разрабатываются для каждого города отдельно. Для ряда городов такие схемы разработаны. Выполнено достаточно широкое испытание и внедрение полученных прогностических положений (Информационный бюллетень, 2007, 2008; Костарева, 2006; Костарева, Сонькин, 2005).

Эффективными оказались схемы прогноза ЭВУЗВ, разработанные для Перми, Екатеринбурга, Челябинска и ряда других городов. При этом использовались как метод множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей, так и метод графической регрессии (Руководство, 1993; Сонькин, 1991). Следует отметить, что испытания как правил для прогноза ЭВУЗВ, так и специально разработанных для этой цели схем прогноза повсеместно оказались весьма успешными. Такие работы проведены во многих городах ряда регионов (Уральского, Башкирского, Центрального, Центрально-Черноморского, Северного, Северо-Кавказского) (Информационный бюллетень, 2007, 2008).

Важно отметить значительную эффективность схем, разработанных с использованием метода графической регрессии с включением только двух, но наиболее значимых предикторов — Sn и P' (параметр P в предшествующий день). Схема включает только один график и после установления предиктора Sn легко и быстро разрабатывается. Она очень удобна для использования в оперативной работе. Именно такой вариант статистической схемы использован для решения задачи прогноза ЭВУЗВ в регионе.

В результате анализа синоптических условий загрязнения воздуха в рассматриваемых городах Уральского региона установлено, что зависимость параметра P от синоптических условий в каждом из городов практически одинаковая. Это и позволило решать задачу прогноза ЭВУЗВ в городах региона, принимая одинаковые значения предиктора Sn для каждого из городов, в том числе одинаковые неблагоприятные синоптические ситуации (B_t и B_n), неблагоприятные особенности (B_{oc}), неблагоприятные преобразования процессов ($B_{пр}$).

К неблагоприятным относятся следующие ситуации:

$A_{ст}$ — центральная область стационарного антициклона;

Γ_c — устойчивый гребень со стороны сибирского максимума;

A_r — антициклоническое ядро, сформировавшееся в гребне сибирского максимума;

M_c — устойчивое сохранение (не менее двух суток) малоградиентного поля в барической седловине (в основном летом);

D — южная, юго-восточная и восточная далекие периферии обширного глубокого циклона.

К особенностям синоптических процессов, которые способствуют увеличению уровня загрязнения воздуха в городе, относятся:

малоподвижный фронт (Φ);

теплая воздушная масса (ТВМ);

расположение западнее, северо-западнее или севернее рассматриваемого города (на расстоянии не более 500 км) периферии обширного глубокого циклона (D');

область тепла или гребень тепла на карте ОТ 500/1000 (Т);

туман, дымка (тд);

приземная инверсия в утренние часы, сохраняющаяся днем или переходящая в приподнятую с высотой нижней границы менее 500 м (Ид).

Прогноз каждой из перечисленных особенностей добавляет к Sn один балл. Полезным был учет в качестве неблагоприятных особенностей некоторых погодных характеристик, в первую очередь неблагоприятного направления ветра (Информационный бюллетень, 2007).

Наибольшие значения B_t (4 балла) и $B_{ц}$ (2 балла) связаны с формированием самых неблагоприятных ситуаций ($A_{ст}$, A_t , M_c , G_c), наименьшие — с циклоническими ситуациями (0—1 балл). Для оценки $B_{пр}$ учитываются выявленные неблагоприятные преобразования, в первую очередь переход от западной, северо-западной и северной периферии антициклона (ПАЗ, ПАСЗ, ПАС) или ситуации Д к антициклонической ситуации или к малоградиентному полю М.

Далее по данным для Перми, Екатеринбурга, Березников, Соликамска, Губахи за шестилетний период (2000—2005 гг.) за холодную и теплую часть года разработаны схемы прогноза ЭВУЗВ. Для каждого из этих городов использован один и тот же статистический метод графической регрессии с включением двух наиболее значимых предикторов — Sn и P' . Такой подход является достаточно простым, однако весьма эффективным. Разработка таких схем прогноза повсеместно обеспечивала хорошую оправдываемость прогнозов ЭВУЗВ и предсказуемость наиболее опасных эпизодов (Информационный бюллетень, 2007, 2008; Костарева, 2006).

Всего составлено десять графиков (для каждого города по данным холодной и теплой части года). Все схемы оказались достаточно эффективными (табл. 1).

Прогностический график для Перми за холодную часть года представлен на рис. 1.

По использованному для разработки материалу было составлено 125 прогнозов ЭВУЗВ, из которых оправдалось 106 (85 %). Оправдавшимися считались случаи, когда $P > 0,4$. В рассмотренный период в указанных выше городах в течение летнего и зимнего сезонов отмечено 74 случая с ЭВУЗВ, из которых 71 было предсказано (93 %).

Таблица 1

Эффективность схем прогноза ЭВУЗВ в городах региона

Город	Сезон	Число прогнозов ЭВУЗВ	Число оправдавшихся прогнозов	Общее число ЭВУЗВ	Было предсказано ЭВУЗВ
Пермь	Зима	19	18	15	14
	Лето	10	9	12	10
Екатеринбург	Зима	17	15	12	11
	Лето	14	13	5	5
Соликамск	Зима	13	12	3	3
	Лето	18	11	4	4
Березники	Зима	10	9	6	6
	Лето	10	8	5	5
Губаха	Зима	8	6	7	6
	Лето	6	5	5	5

Эффективность разработанных схем была проверена на независимом материале по данным четырех городов Пермского края (Пермь, Березники, Соликамск, Губаха) за 2008 г. Было составлено 47 прогнозов ЭВУЗВ, из которых оправдалось 44 (94 %). Из 42 случаев ЭВУЗВ, которые были отмечены в указанных городах, было предсказано 34 (81 %).

Из сказанного видно, что все разработанные схемы прогноза ЭВУЗВ являются достаточно эффективными. Они уже используются в оперативной работе в Пермском ЦГМС. При этом для каждого из пяти городов в схемы включались одинаковые значения синоптического предиктора Sn . Следовательно, такой же предиктор Sn может быть применен для любого города (по крайней мере, с населением не менее 150—200 тыс. человек) достаточно крупного региона. В Уральском регионе расположено несколько десятков таких городов.

Рекомендация по прогнозу ЭВУЗВ в каждом из городов региона при отсутствии разработанной прогностической схемы заключается в следующем. Сначала прогнозируется принятый синоптический предиктор Sn . Ожидаемое большое значение Sn уже является определенным предостережением. Было показано, что

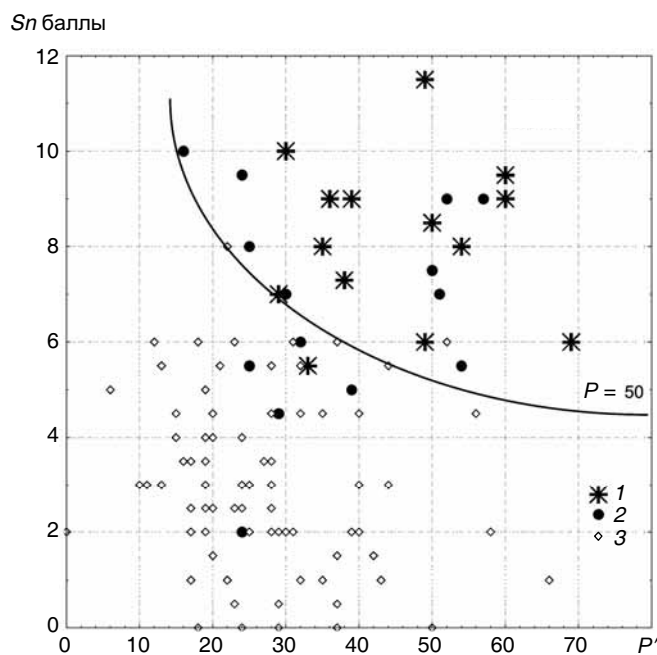


Рис. 1. Схема прогноза ЭВУЗВ по методу графической регрессии по данным для Перми (холодный период).

1) $P \geq 50$, 2) $40 \leq P < 50$, 3) $P < 40$.

в рассмотренных городах ЭВУЗВ формируется, когда Sn превышает 8—9 баллов. Дополнительно учитывается имеющаяся информация о состоянии воздушного бассейна города на момент прогноза. На этом основании делается вывод о возможном формировании ЭВУЗВ. При этом учитывается прогноз для близлежащего города.

Представляет интерес вопрос о возможности оценки и прогноза состояния загрязнения воздуха в целом по региону. Оказалось, что имеется тенденция к одновременному формированию ЭВУЗВ в городах заданного региона. Так, в течение рассмотренного периода в Перми отмечалось 35 дней с ЭВУЗВ. При этом в четырех близлежащих городах в эти дни имелись данные о 132 значениях параметра P . ЭВУЗВ с $P > 0,4 \dots 0,5$ отмечались 30 раз (23 %), а

случаи высокого загрязнения воздуха ($P > 0,3$) — 70 раз (53 %). Средняя повторяемость таких случаев составляет 2 и 10 % соответственно. Неслучайность тенденции к одновременному формированию высоких уровней загрязнения в городах региона очевидна. Близкие результаты имеют место, если рассматривать случаи ЭВУЗВ в четырех других городах.

Была сделана попытка получения общих по региону характеристик загрязнения воздуха с использованием метода разложения по естественным ортогональным функциям. При этом использовались ряды параметра P для пяти рассмотренных городов. В табл. 2 приводятся коэффициенты линейной корреляции (r) между значениями P в рассматриваемых городах. Все значения r положительны.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между значениями параметра P в городах Уральского региона

Город	Пермь	Березники	Соликамск	Губаха	Екатеринбург
Пермь	1,0	0,35	0,24	0,36	0,23
Березники	0,35	1,0	0,31	0,22	0,29
Соликамск	0,24	0,31	1,0	0,19	0,12
Губаха	0,36	0,22	0,19	1,0	0,34
Екатеринбург	0,23	0,29	0,12	0,34	1,0

Ряды для расчета r содержат более 400 случаев.

Ряды параметра P в пяти городах региона ($P(x, t)$) представляются в виде суммы членов разложения, каждый из которых характеризует определенное свойство процесса загрязнения воздуха в городах региона:

$$P(x, t) = \bar{P}(x) + \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) \varphi_i(x),$$

где n — число членов разложения по е. о. ф. (соответствует числу рассматриваемых городов в регионе и в нашем случае равно пяти); $\alpha_i(t)$ — коэффициенты разложения, зависящие от времени t ;

$\varphi_i(x)$ — естественные ортогональные функции, компоненты которых относятся к отдельным городам.

Важная особенность метода разложения по е. о. ф. заключается в том, что первые члены разложения дают наибольший вклад в общую изменчивость изучаемой характеристики. В нашем случае первая составляющая включает 45 % изменчивости загрязнения воздуха в рассматриваемом регионе. Она характеризуется одинаковыми по знаку изменениями параметра P во всех пяти городах. Компоненты φ_1 во всех городах положительны. Вклад второй составляющей в общую изменчивость параметра P в регионе равен 21 %. Для всех городов за исключением Екатеринбурга значения компонентов φ_2 отрицательны. Вклады остальных трех составляющих незначительны.

Обобщенными характеристиками загрязнения воздуха в регионе являются зависящие от времени коэффициенты разложения $\alpha_i(t)$. Наибольший интерес представляют значения 1-го коэффициента разложения α_1 . Предварительный анализ показал, что при больших значениях α_1 практически во всех городах отмечаются высокие значения P , в основном достигающие ЭВУЗВ. Характерно, что существует достаточно сильная корреляция между α_1 и параметром P в каждом из пяти городов. Значения r колеблются от 0,70 до 0,54. Уточнение синоптических ситуаций, при которых отмечаются α_1 , и последующая разработка схемы прогноза α_1 позволят ежедневно оценивать ожидаемое общее состояние загрязнения воздуха в регионе.

Заключение

В результате выполненного исследования получены следующие основные результаты:

- 1) выявлена тенденция к одновременному формированию экстремально высоких уровней загрязнения воздуха (ЭВУЗВ) в близлежащих городах промышленного региона;
- 2) показана возможность и целесообразность использования одного и того же синоптического предиктора Sn для промышленных городов в пределах региона;

3) показана эффективность синоптико-статистических схем прогноза ЭВУЗВ, включающих два наиболее значимых предиктора — синоптический предиктор Sn и параметр загрязнения воздуха в городе в предшествующий день P' ; показано успешное использование таких схем в разных регионах Российской Федерации;

4) по материалам группы городов Уральского региона показано, что в дни с большими значениями параметра P , соответствующими ЭВУЗВ, в городах реально имеют место опасные концентрации примесей в воздухе, значительно превышающие в ряде случаев ПДК;

5) даны рекомендации по прогнозированию ЭВУЗВ в промышленном регионе, в том числе в городах, для которых имеющихся материалов недостаточно для разработки прогностических положений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Информационный бюллетень за 2006 год. Состояние работ по прогнозу загрязнения воздуха в городах Российской Федерации (2007). — Н. Новгород: Вектор ТиС. — 75 с.

Информационный бюллетень за 2007 год. Состояние работ по прогнозу загрязнения воздуха в городах Российской Федерации (2008). — СПб.: Астерион. — 56 с.

Кириллова В. И. (1998). Возможности прогноза максимальных концентраций примесей в городском воздухе. — Труды ГГО, вып. 549, с. 200—210.

Костарева Т. В. (2006). Схемы прогнозирования ЭВУЗВ для г. Пермь. — В сб.: Информационный бюллетень за 2005 год. Состояние работ по прогнозу загрязнения воздуха в городах Российской Федерации. — М., с. 36—41.

Костарева Т. В., Сонькин Л. Р. (2005). Некоторые вопросы предупреждения и предотвращения высоких уровней загрязнения воздуха в периоды НМУ (на примере г. Пермь и Пермской области). — В сб.: Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. Информационный бюллетень НПК «Атмосфера» при ГГО, № 2(32).

РД 52.04.306—92. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха (1993). — СПб.: Гидрометеиздат. — 104 с.

Система прогноза и предотвращения высоких уровней загрязнения воздуха в городах (2004). — СПб.: Гидрометеиздат. — 129 с.

Сонькин Л. Р. (1991). Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. — 224 с.

Сонькин Л. Р., Николаев В. Д., Кириллова В. И. (2003). Условия формирования и возможности прогноза катастрофического загрязнения воздуха в городах. — Труды ГГО, вып. 551, с. 114—125.

Сонькин Л. Р., Николаев В. Д. (1993). Синоптический анализ и прогноз загрязнения атмосферы. — Метеорология и гидрология, № 5, с. 14—20.

Сонькин Л. Р., Николаев В. Д. (1998). Состояние работ по прогнозу загрязнения воздуха на территории Российской Федерации. — Труды ГГО, вып. 549, с. 146—156.

Barret C. F. (1962). Correlation of smoke concentration in Great Britain. — *J. Air&Water Pollution*, V. 7, p. 7—8.

Martin A. E. (1959). Atmospheric pollution in Great Britain — the London fog of 2—5 December. — *Int. J. Air Pollution.*, V. 2, № 15.

УДК 551.55

**ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ЭНЕРГИИ
ВЕТРА В НИЖНЕМ 200-МЕТРОВОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ
НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

М. М. Борисенко, Е. О. Гобарова, Е. Л. Жильцова

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

Поступила в редакцию 5.03.2010

Поступила после доработки 24.03.2010

Для обеспечения задач ветроэнергетики наиболее полезны данные метеостанций, на которых средняя годовая скорость ветра составляет от 5 до 10 м/с. При таких условиях потенциал энергии ветра в слое атмосферы толщиной 200 м над территорией Ленинградской области достаточен для использования в области мощных ВЭУ, что подтверждено результатами последних работ. Именно этот слой атмосферы представляет наибольший интерес при решении таких практических вопросов, как определение ветроэнергетического потенциала для использования установок мегаваттного класса и выбора системы их размещения на местности.

По данным на сегодняшний день высота расположения оси ветроколеса над подстилающей поверхностью у таких установок не превышает 160 м. Основные сведения о них даны в работе Борисенко и др. (2008). Заметим, что в последние годы появились сведения об успешных результатах работ в области создания еще более мощных ВЭУ, и в частности ВЭУ шельфового базирования фирм EMERCON-126 с единичной мощностью 6 МВт, фирм MULTIBRID и PERPOWER мощностью 5 МВт, а также фирмы PERPOWER с единичной мощностью 6 МВт. Сравнительный вклад в развитие ветроэнергетики экономически развитых стран можно почерпнуть из табл. 1 (Николаев и др., 2008). Интересно сопоставить представленные данные по передовым в техническом отношении странам с данными для государств—членов СНГ. Так,

Таблица 1

**Сведения об установленной мощности ВЭС (МВт) и ее доли (%)
от мировой в различных странах**

Страна	Мощность ВЭС			
	введенная в 2005 г.		суммарная установленная к концу 2005 г.	
	МВт	%	МВт	%
Австралия	328	2,8	—	—
Великобритания	446	3,8	1353	2,3
Германия	1808	15,4	18428	31,0
Дания	—	—	3122	5,3
Индия	1430	12,2	4430	7,5
Испания	1764	15,0	10027	16,9
Италия	452	3,8	1717	2,9
Китай	498	4,2	1260	2,1
Нидерланды	—	—	1219	2,1
Португалия	500	4,2	—	—
США	2431	20,7	9149	15,4
Франция	367	3,1	540	0,9
Япония	—	—	1231	2,1
<i>Сумма первых десяти</i>	<i>10024</i>	<i>85,2</i>	<i>51936</i>	<i>87,5</i>
<i>Остальные страны</i>	<i>1745</i>	<i>14,8</i>	<i>7368</i>	<i>12,5</i>
<i>Мир в целом</i>	<i>11769</i>	<i>100,0</i>	<i>59322</i>	<i>100,0</i>

по состоянию на 2008 г. наибольшие успехи достигнуты на Украине, где удельная мощность всех действующих ВЭУ составляет лишь 90 МВт. Совсем скромными в этой области выглядят достижения России — 14,5 МВт.

Возвращаясь к табл. 1, следует констатировать, что на сегодняшний день бесспорными лидерами по использованию ВЭР в мире являются США, Германия и Испания.

В процессе последних исследований авторами была построена карта фоновое районирования территории России по удельной мощности ветрового потока (N) на уровне 100 м над подстилающей поверхностью (Борисенко и др., 2008). Подобные карты не могут с необходимой степенью точности отразить характер мезомасштабной изменчивости N_e для ограниченных регионов, к ко-

торым относится, в частности, и Ленинградская область. Конкретно, наиболее ценными являются сведения об удельной мощности N_e на прибрежных участках суши Финского залива и в прилегающих зонах его акватории.

Карта районирования Ленинградской области по удельной мощности N_e на уровне 200 м была построена на основе следующих материалов. Использовались во-первых, данные о ветровом климате из разработанного совместно со специалистами РДИИЭ Атласа ветров России (2000), во-вторых, сведения из Справочника по климату СССР, ч. III, вып. 3, и, в-третьих материалы оригинальной разработки по распределению скорости ветра в восточной части Финского залива. В дальнейшем на указанной акватории были выделены четыре ветровые зоны.

Особенностью последней разработки является преимущественное использование в качестве исходного материала данных попутных судовых измерений общим числом свыше 20 тысяч за 50-летний период. Эта работа была выполнена совместно с А. В. Смирновой (Смирнова и др., 1989). Помимо результатов морских измерений, использованы данные регулярных измерений ветра на суше и островах Финского залива, проведенные на 42 метеостанциях в течение 40 лет. Положение на карте Ленинградской области метеостанций, данные которых были использованы, приведено на рис. 1.

В результате проведенных исследований установлено наличие хорошей корреляционной связи между значениями средней годовой скорости ветра у поверхности Земли \bar{u}_{10} и удельной мощности ветрового потока N_e на высоте 200 м. Так, коэффициент линейной корреляции между этими величинами оказался равным 0,95. Более точно связь между \bar{u}_{10} и N_{e200} аппроксимируется полиномиальным уравнением второй степени. Линейная и полиномиальная зависимости второй степени описываются соответственно следующими формулами:

$$N_{e200} = 337\bar{u}_{10} - 917, \quad (1)$$

$$N_{e200} = 32\bar{u}_{10}^2 + 4,4\bar{u}_{10} - 132. \quad (2)$$

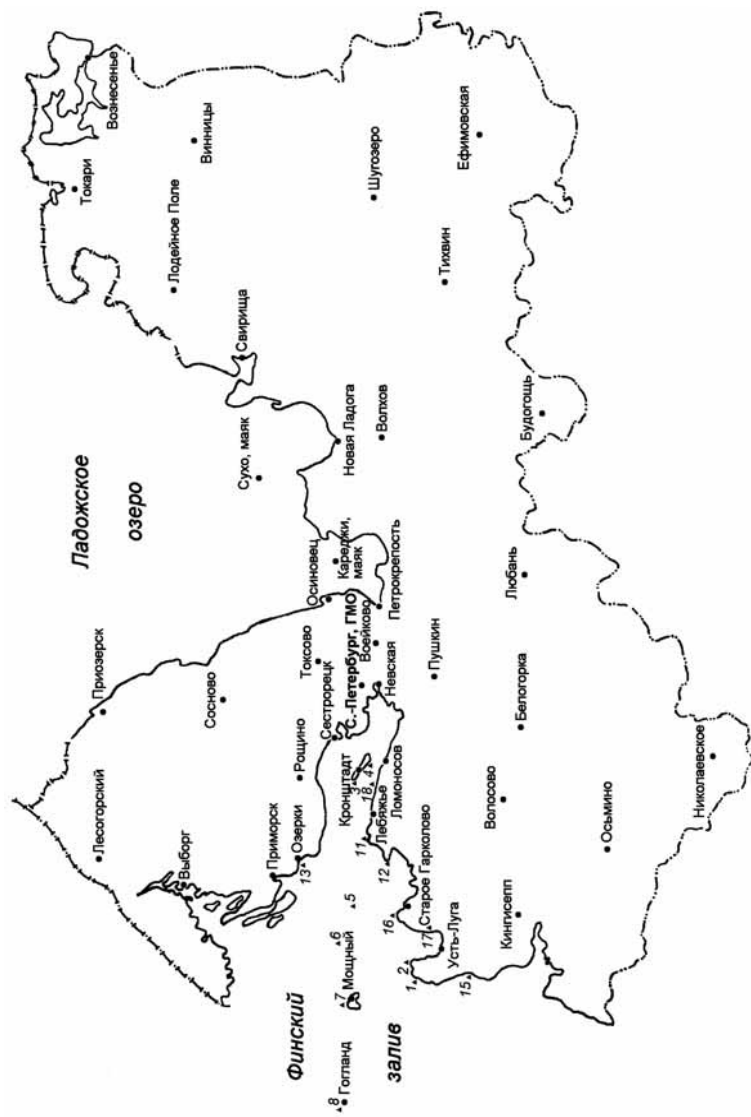


Рис. 1. Карта сети метеостанций Ленинградской области. Номера на побережье и акватории Финского залива обозначены площадки предполагаемого размещения мощных ВЭУ.

Графически связь удельной мощности ветрового потока на уровне 200 м со средней годовой скоростью \bar{u}_{10} показана на рис. 2. Из рисунка можно заключить, что полиномиальная зависимость второй степени точнее аппроксимирует связь упомянутых параметров, нежели линейная. Преимущества принятой авторами полиномиальной зависимости второй степени обосновываются меньшим значением стандартного отклонения ($\sigma N_{e200} = 77 \text{ Вт/м}^2$) по сравнению с линейной корреляционной зависимостью ($\sigma N_{e200} = 138 \text{ Вт/м}^2$), причем $r [N_{e200}; \bar{u}_{10}] = 0,95$.

На рис. 3 представлено районирование области по средней годовой скорости ветра на высоте 10 м. Используемые данные приведены к 10-минутному интервалу осреднения и характеризуют условия подстилающей поверхности с уровнем закрытости не более 66 (класс открытости 7 по шкале Милевского). В последующем значения скорости ветра \bar{u}_{10} нами приведены с помощью методик

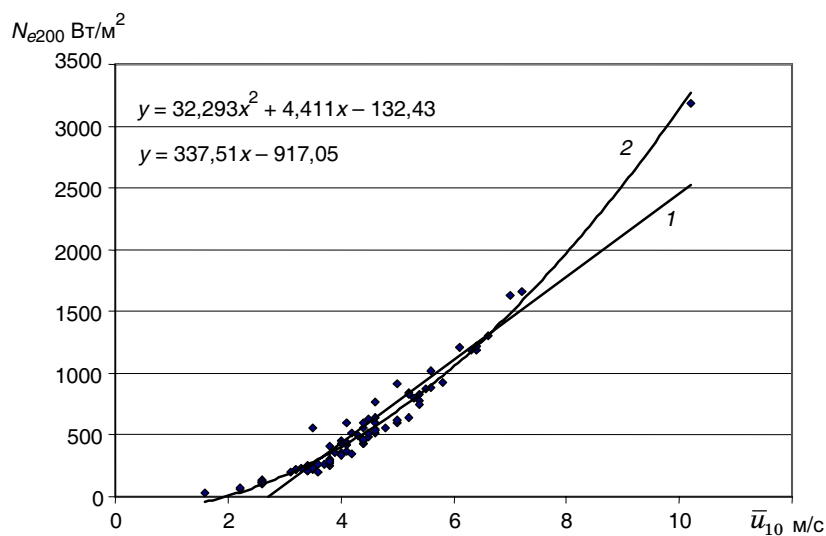


Рис. 2. Связь удельной мощности ветрового потока на высоте 200 м (N_{e200}) со средней годовой скоростью ветра на высоте 10 м (\bar{u}_{10}).
1 — линейная зависимость, 2 — полиномиальная зависимость второй степени.

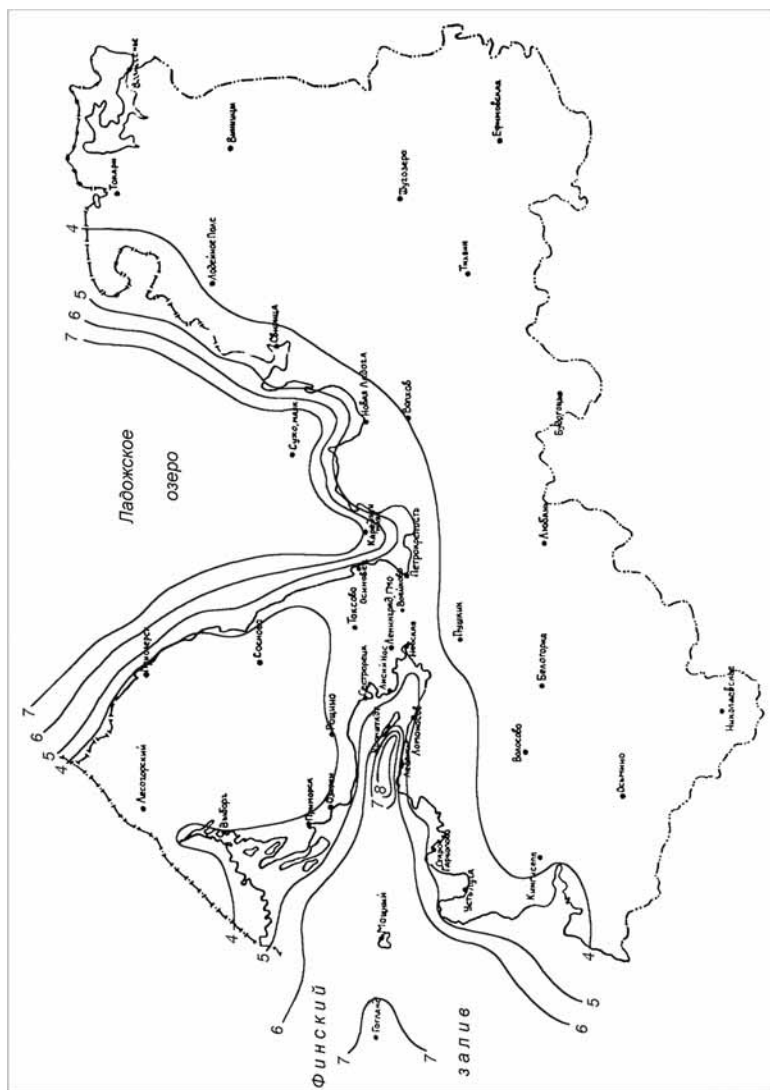


Рис. 3. Распределение средней скорости ветра (м/с) на высоте 10 м по территории Ленинградской области.

из Атласа ветров России к условиям открытого морского побережья и прибрежных морских участков шельфовых зон. Далее с использованием формулы (2) были вычислены значения удельной мощности ветра для высоты 200 м по всем упомянутым станциям и участкам акватории Финского залива. Оценки средней годовой скорости ветра на высоте 200 м произведены на основе уточненных значений скорости на этой высоте, полученных ранее и приведенных в Атласе ветров России. Значения скорости ветра приводились к унифицированному интервалу осреднения 10 мин (рекомендации ВМО). Полученные данные легли в основу районирования региона по удельной мощности ветрового потока N_{e200} (рис. 4).

Дополнительно к приведенным выше результатам было произведено уточнение оценок ВЭП для площадок, ранее выбранных специалистами ВНИИГ им. Веденеева и СПбПУ для островов и участков Финского залива. Таких площадок первоначально предполагалось выбрать более 20. Практическое значение может

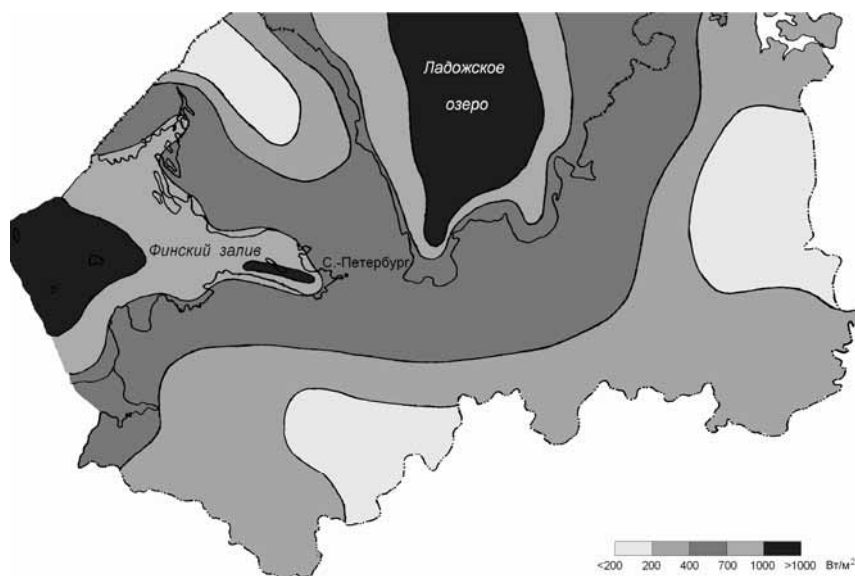


Рис. 4. Районирование Ленинградской области по удельной мощности ветрового потока на высоте 200 м.

иметь анализ данных по 18 наиболее перспективным площадкам для установки мощных ВЭУ (Борисенко, 2006). В табл. 2 приведены сведения о характеристиках ветроэнергетического потенциала над 18 пунктами в зоне Финского залива для высот от 10 до 200 м. Из таблицы можно заключить, что наиболее благоприятными для ветроэнергетики являются площадки в южной части Финского залива, а также в его западной части. Для девяти площадок на уровне 200 м ветроэнергетический потенциал N_e соответствует шестому району. Площадки, намеченные для размещения ВЭУ у северного побережья залива, значительно менее благоприятны для развития ветроэнергетики.

Таблица 2

Природно-климатический потенциал энергии ветра (N_e Вт/м²) для площадок предполагаемого возведения ВЭУ в Ленинградской области

№ п/п	Площадка	Номер района	\bar{u}_{10} м/с	Высота, м					
				10	25	50	100	150	200
1	Кургальский риф	5	5,5	203	305	420	580	640	740
2	Лондонская отмель	5	7,0	384	586	780	1000	1240	1440
3	Опытная ВЭС на о. Котлин	6	6,0	251	388	510	720	840	1020
4	о. Котлин	6	6,0	251	388	510	720	840	1020
5	о. Сескар	6	6,3	276	425	585	790	950	1100
6	о. Малый	6	6,5	307	464	606	812	1000	1140
7	о. Мощный	6	6,5	307	464	606	812	1000	1140
8	о. Гогланд	6	7,0	384	586	780	1000	1240	1440
9	о. Большой Тютерс	6	6,5	307	464	606	812	1000	1140
10	о. Малый Тютерс	6	6,7	324	486	660	940	1020	1250
11	мыс Шепелево	6	6,5	307	464	606	812	1000	1140

Окончание табл. 2

№ п/п	Площадка	Номер района	\bar{u}_{10} м/с	Высота, м					
				10	25	50	100	150	200
12	мыс Устинский	5	5,0	163	244	330	430	490	560
13	пос. Озерки	5	4,8	152	220	310	410	480	600
14	мыс Кайболово	5	5,5	203	305	420	580	640	740
15	мыс Конново	5	5,0	163	244	330	430	490	590
16	мыс Колгомия	5	5,0	163	244	330	430	490	560
17	пос. Мишино	4	4,6	142	218	280	330	460	500
18	«Бронка»	5	5,5	203	305	420	580	640	740

Установлено, что на территории Ленинградской области, равно как и на акватории Финского залива, имеют место долгопериодные циклические изменения скорости ветра продолжительностью от 30 до 50 лет (рис. 5 и 6). По крайней мере, на протяжении

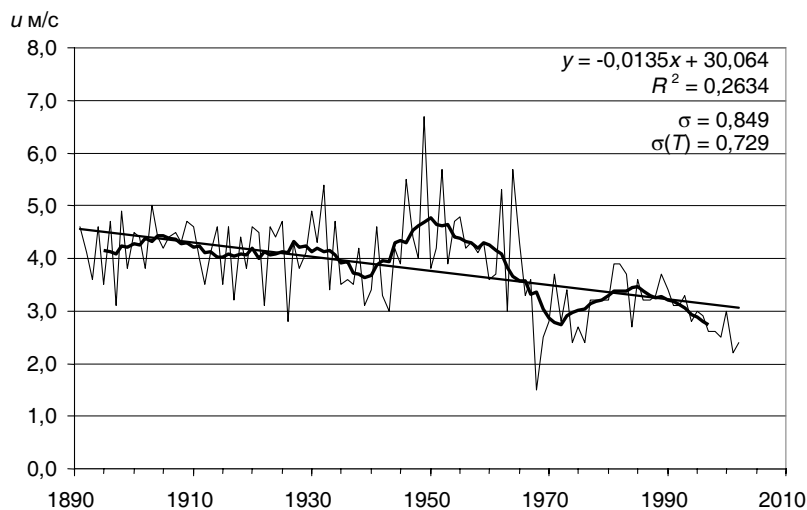


Рис. 5. Временная изменчивость скорости ветра в январе в Санкт-Петербурге.

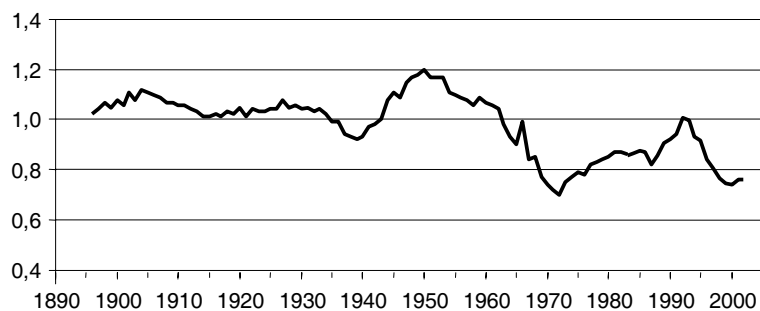


Рис. 6. Нормированные значения скорости ветра за период 1896—2002 гг. для восточной части Финского залива в январе.

XX столетия, точнее периода 1890—2005 гг., выявлено наличие трех таких циклических колебаний скорости ветра. Максимальная амплитуда скорости, нормированная на 110-летнее значение нормы скорости, составила 0,7—1,2 (данные получены методом скользящего осреднения по 10-летнему интервалу). Значения линейного тренда в 100-летнем диапазоне в 3—4 раза меньше значений амплитуд 30—50-летних циклических колебаний.

Проведенное исследование позволило сделать следующие основные выводы.

1. Установлено наличие тесной корреляционной связи между скоростью ветра на уровне 10 м и значением удельной мощности N_e на уровне 200 м над территорией региона. При этом корреляционная связь между указанными параметрами точнее аппроксимируется полиномом второй степени, нежели уравнением линейной связи.

2. Из 18 выбранных для строительства ВЭУ площадок наиболее перспективными для развития ветроэнергетики представляются расположенные на прибрежных участках южной части Финского залива, где N_e достигает 1400 Вт/м² и более.

3. Доказано наличие долгопериодной циклическости в вековом ходе скорости ветра как на открытой акватории залива (длительность цикла 30—50 лет), так и на участках суши исследуемого региона. Тем самым подтверждено существование циклов Бриккнера в XX столетии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агалаков В. С., Корнюшин О. Г. (1985). Климатические характеристики ветра в пограничном слое атмосферы над СССР в связи с оценкой ветроэнергетических ресурсов. — Труды ВНИИГМИ—МЦД, вып. 125, с. 3—10.
- Атлас ветров России (2000) / А. Н. Старков, Л. Ландберг, П. П. Безруких, М. М. Борисенко. — М.: Можайск-Терра. — 560 с.
- Борисенко М. М. (2007). Климатические характеристики ветроэнергетических ресурсов на территории Ленинградской области. — В сб.: Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. Инф. Бюл. № 2(36), с. 119—131.
- Борисенко М. М. (2006). Практические рекомендации по ветроэнергетике Северо-Запада. — Академия Энергетики, № 4 (12), с. 56—59.
- Борисенко М. М., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л. (2008). Оценка ветроэнергетических ресурсов на территории России. — Труды ГГО, вып. 557, с. 53—66.
- Брюхань Ф. Ф., Корнюшин О. Г., Пономаренко Л. В. (1987). Ветроэнергетический потенциал нижнего 500-метрового слоя атмосферы над территорией СССР. — Изв. АН СССР, сер. геогр., № 3, с. 76—82.
- Ветроэнергетика (1982) / Под ред. Д. де Рензо. — М.: Энергоатомиздат. — 272 с.
- Дробышев А. Г., Курыгина Л. И. (1987). Восстановление статистических характеристик скорости ветра в 500-метровом слое атмосферы. — Труды ЗапСибНИИ, вып. 80, с. 11—21.
- Елистратов В. В., Кузнецов М. В. (2004). Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ч. I. Определение ветроэнергетических ресурсов региона СПб. — Изд. СПбГПУ. — 59 с.
- Мазурова Н. Н., Борисенко М. М. (1996). Климатические исследования ветроэнергетических ресурсов России. — В кн.: Нетрадиционная энергетика: ресурсы, техника, экономика, экология. — СПб.: Изд. ГТУ, с. 11—14.
- Николаев В. Г., Ганага С. В., Кудряшов Ю. (2008). Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. — М.: Атмограф, 584 с.
- Смирнова А. В. и др. (1989). Исследование ветроэнергетических ресурсов Ленинградского региона. — В сб. ЛГМЦ, вып. 4 (17), с. 3—33.
- Justus C. G., Mikhail A. (1976). Height variations of wind speed and wind distributions statistics. — Geophy. Res. Lett., 3, p. 261—264.
- Palutikov J. P., Kelly P. M., Davis (1986). Wind speed variations and climate change. — Wind Engineering, V. 10, No. 4, p. 182—190.

УДК 551.52.521

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОЖИДАЕМОГО К СЕРЕДИНЕ XXI ВЕКА
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ПОТЕНЦИАЛ
МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ
(НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Е. М. Акентьева, Е. В. Иванова

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

Поступила в редакцию 3.02.2010
Поступила после доработки 10.03.2010

В условиях России малая гидроэнергетика является одним из наиболее подготовленных для реализации возобновляемым источником энергии. Однако для обоснования перспектив развития гидроэнергетики необходима разработка методик по достоверной оценке основных категорий ее потенциала: валового, технического и экономического, а также возможного изменения этого потенциала в связи с климатическими изменениями (Шикломанов и др., 1991; IPCC, 2007; Оценочный доклад, 2008).

В данной работе оценка потенциала малой гидроэнергетики и его вероятного изменения к середине XXI века была проведена на примере расчета различных категорий гидроэнергетического потенциала Архангельской области. Для анализа были привлечены данные о величине годового стока за периоды 1980—2000 и 2041—2060 гг., полученные по ансамблю 16 моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) в отделе динамической метеорологии (ОДМ) ГГО. Подробная информация о климатических моделях и их пригодности для расчетов будущих изменений климата России, в частности слоя стока, содержится в работах Говорковой и др. (2008), Мелешко и др. (2008), Kattsov et al. (2008) и др.

Модели общей циркуляции атмосферы и океана используют в расчетах различные сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозолей в зависимости от сюжетных линий будущего развития мира. В данной работе были использованы результаты моделирова-

ния будущего климата по сценарию А2. Этот сценарий является наиболее «жестким», т. е. предполагает наиболее быстрый рост концентрации парниковых газов. Выбор такого сценария был обусловлен тем, что в условиях значительной неопределенности будущей экономической и политической ситуации наиболее информативной и оправданной является оценка «сверху» ожидаемых изменений климатических параметров.

Годовая величина стока была определена как остаточный член в уравнении водного баланса, т. е. как разность между суммой осадков и величиной испарения. Среднее ожидаемое изменение стока к середине XXI века в этом районе составляет $11 \pm 7\%$, где 7% — межмодельный разброс значений слоя стока, примерно характеризующий точность полученных данных (Оценочный доклад, 2008).

Надо отметить, что полученное таким образом значение стока, строго говоря, не является истинным, т. е. определенным гидрометрическими методами. В работе Кислова и др. (2008) для связи «климатического» и «гидрологического» стока были рассчитаны уравнения регрессии и проанализированы расхождения между этими характеристиками. На основании полученных зависимостей (рис. 1) можно сделать вывод о том, что данные

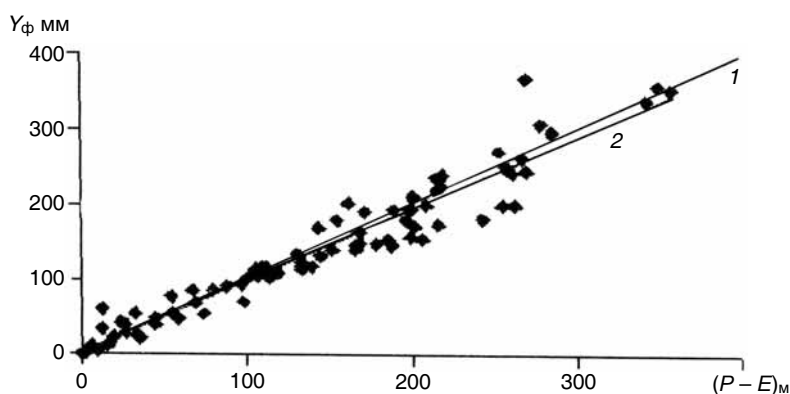


Рис. 1. График связи модельного климатического стока $(P - E)_m$ с фактическим гидрометрическим стоком $(Y_ф)$ (по работе Кислова и др. (2008)).

1 — биссектриса, 2 — прямая регрессии.

о «климатическом стоке» могут быть привлечены для ориентировочных оценок «сверху» возможного изменения выработки электроэнергии. Наиболее точно сток может быть оценен в области годовых его значений до 350 мм.

Для выявления связи между величиной слоя стока (мм) и модулем стока (л/(с · км²)), входящим в расчет гидроэнергетического потенциала, была определена зависимость между этими характеристиками для равнинной территории европейской части России (ЕЧР) на основании данных табл. 1 (Михайлов и др., 2005). Вид полученной зависимости представлен на рис. 2.

Таблица 1

Модуль стока и слой стока в бассейнах рек на равнинной части ЕЧР

Река	Модуль стока, л/(с · км ²)	Слой стока, мм
Печора	12,5	350
Северная Двина	9,8	315
Верхняя Волга	6,1	250
Ока	5	200
Дон	2,1	50
Урал	1,6	25

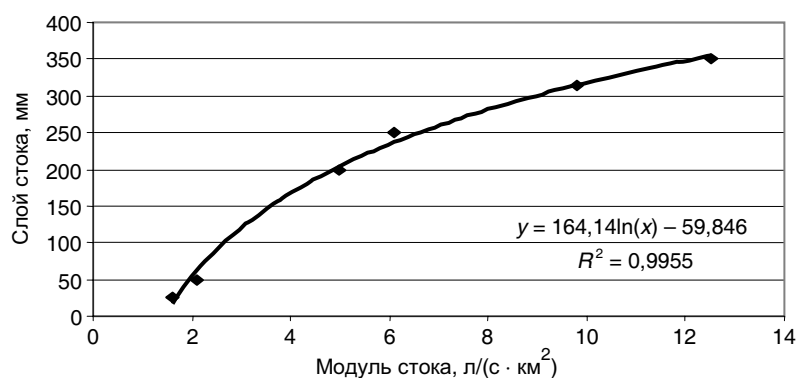


Рис. 2. Зависимость между слоем стока и модулем стока на равнинной части ЕЧР.

На основе данных о гидрологических характеристиках рек Архангельской области из работы Безруких и др. (2002) и приведенной на рис. 2 зависимости был рассчитан валовой потенциал малой гидроэнергетики для двух рассматриваемых периодов (табл. 2). Для анализа были выбраны только те реки, на которых экологическими службами разрешено строительство гидротехнических сооружений.

При расчете потенциальной энергии водотока \mathcal{E} (ГВт · ч) была использована формула

$$\mathcal{E} = 85,94 \cdot mFH/2,$$

где m — модуль стока (л/(с · км²)), F — площадь водосбора (км²), H — падение реки (м).

Таблица 2

Расчет валового гидроэнергетического потенциала Архангельской области для двух рассматриваемых периодов: 1980—2000 гг. (I) и 2041—2060 гг. (II)

Река	Длина, км	F км ²	Модуль стока, л/(с · км ²)		H м	Потенциальная энергия, ГВт · ч	
			I	II		I	II
Брусовица	68	323	12,1	13,2	49,8	8,35	9,1
Верхняя Мгла	59	354	11	12,0	53,8	9,02	9,8
Вонгуда	57	407	11	12,1	110	21,15	23,3
Долгая	45	179	10	10,9	93,1	7,18	7,8
Елва Мезенская	84	766	12	13,1	80,5	31,81	34,6
Кехта	76	432	11	11,9	48,9	9,87	10,8
Кимжа	158	1490	9,5	10,3	73,8	45,18	48,8
Кинема	50	514	10	11,0	115,2	25,27	27,9
Ковжа	108	1080	10	10,8	42,6	19,71	21,4
Кодина	183	2700	10,8	11,6	69,5	79,11	93,9
Колозьма	82	330	12	13,3	127,4	21,40	24,0
Коноша	45	203	10	10,7	208,2	17,89	19,4
Ледь	184	2690	7,5	7,9	172,8	149,73	158,6
Лекшма	73	1070	8,7	9,3	371	14,83	158,8

Окончание табл. 2

Река	Длина, км	F км ²	Модуль стока, л/(с · км ²)		H м	Потенциальная энергия, ГВт · ч	
			I	II		I	II
Лельма	88	1270	9,1	9,7	72,9	33,39	38,6
Лепша	168	1680	9,5	10,2	38,5	26,29	28,3
Лим	104	544	10	10,8	124	28,78	31,2
Лодьма	138	1910	11	12,1	97,2	82,11	96,6
Лоптюга	152	1620	10,5	11,2	114	83,26	89,1
Мехреньга	231	5080	9	9,8	126,6	248,54	269,7
Мудьюга	119	642	10,5	11,4	153,6	44,13	48,2
Нелеменьга	62	359	10,5	11,3	143,4	23,41	25,0
Немнюга	201	3630	10,7	11,7	77,2	128,50	140,7
Несь	151	1860	11,4	12,4	48,8	44,47	48,4
Нижа	71	650	11	12,0	26,6	8,25	8,9
Нюма	79	584	10,5	11,3	40,8	10,69	11,6
Няндомы	69	349	9	9,6	125	16,64	18,0
Обокша	132	1500	11	11,9	127,7	89,88	97,7
Поча	66	146	9	9,5	44,8	2,50	2,7
Пучкома	25	494	10	10,8	156,5	33,12	35,7
Пысса	164	1160	12,5	13,4	127	79,03	84,5
Пянда	106	920	10,5	11,4	60,9	25,40	27,4
Сия	61	289	9,5	10,2	32,6	9,25	4,1
Снопа	166	1280	12	13,0	62,3	41,37	44,5
Сойга	110	889	11	11,8	154	66,50	69,3
Суханиха	55	292	11,5	12,3	51,1	7,49	7,9
Сюма	100	722	9	9,7	91,5	25,49	27,5
Тарня	100	705	9,5	10,2	90	28,28	27,8
Тихманьга	11	770	10,5	11,2	97,8	34,04	36,4
Токша	132	1610	10	10,8	90,1	62,32	67,5
Чурьёга	106	1390	10	10,7	80,3	47,60	51,2
Ширшема	49	336	11	12,1	54,1	8,60	9,5
Юмиж	180	1220	10,3	11,2	143,9	77,92	84,7
Итого						1877,75	2180,99

При расчете были использованы модельные данные о слое стока в десяти узлах регулярной сетки $2,5 \times 2,5^\circ$, находящихся на территории области или вблизи ее границ (рис. 3). Учитывались также и значения в восьми узлах, находящихся на территории соседних административных единиц. Для периода 1980—2000 гг. измеренный модуль стока сравнивался с модельными данными. Различия в полученных данных не превысили 7 %.

Данные по слою стока были проинтерполированы в бассейны указанных рек. На их основе были определены соответствующие модули стока и рассчитан валовой гидроэнергетический потенциал для каждой реки к середине XXI века. Итоговые значения различных категорий гидроэнергетического потенциала Архангельской области для двух рассматриваемых периодов представлены в табл. 3.

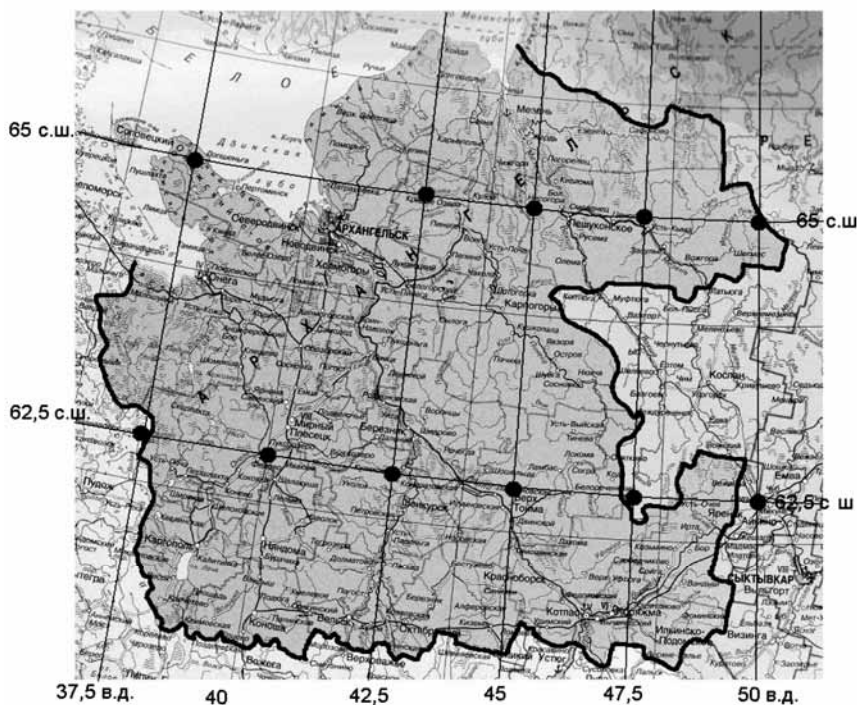


Рис. 3. Карта Архангельской области.

Таблица 3

**Различные категории гидроэнергетического потенциала
Архангельской области на периоды 1980—2000 и 2041—2060 гг.**

Период, годы	Категория гидроэнергетического потенциала, ГВт · ч		
	Валовой	Технико-экологический	Эколого-экономический
1980—2000	1877,8	845,0	464,7
2041—2060	2181,0	981,4	539,8
Изменения, ГВт · ч	303,2	136,5	75,00
Изменения, %	16,1	16,1	16,1

Соотношения между валовым, технико-экологическим и эколого-экономическим гидроэнергетическим потенциалом были определены на основе анализа работ Безруких и др. (2002), Васильева и др. (2008), выполненных на кафедре возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского политехнического университета.

В качестве технико-экологического потенциала малой гидроэнергетики была принята часть валового потенциала, которая может быть использована с учетом современных технических средств и технологий без нанесения ощутимого вреда окружающей среде. Под эколого-экономическим потенциалом понималась та часть технико-экологического потенциала, использование которой экономически оправдано в настоящее время в рассматриваемом регионе при существующем уровне цен на производство, транспортировку и потребление электроэнергии и органического топлива.

Эколого-экономический потенциал, выраженный в монетарной форме, был оценен к началу и середине XXI века из расчета стоимости 1 кВт · ч, равной 1,5 рублей для большинства потребителей области. В начале века он составил 697,1 млн. рублей; к середине века возможно его увеличение до 809,7 млн. рублей, т. е. на 112,6 млн. рублей. Надо отметить, что неопределенности, возникающие на каждом этапе исследования (начиная от выбора сценария будущего развития мира и кончая статистической

связью между слоем стока и модулем стока на площади водосбора конкретной реки), вызывают неточности в прогностических значениях порядка $\pm 10\text{—}12\%$.

Отпуск электроэнергии потребителям области в 2008 г. составил 3580 ГВт · ч. При этом потери энергии при передаче по ЛЭП, которых можно было бы избежать, развивая малую гидроэнергетику, составили 559,9 ГВт · ч, или 13,5 %. Учитывая все вышесказанное, развитие малой гидроэнергетики в Архангельской области можно рассматривать как, несомненно, экономически оправданное и в настоящее время, и в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безруких П. П., Арбузов Ю. Д., Борисов Г. А., Виссарионов В. И., Евдокимов В. М., Малинин Н. К., Огородов Н. В., Пузаков В. Н., Сидоренко Г. И., Шпак А. А. (2002). Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. — СПб.: Наука, 2002. — 314 с.

Васильев Ю. С., Безруких П. П., Елистратов В. В., Сидоренко Г. И. (2008). Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России. — СПб.: Изд-во СПбГТУ. — 250 с.

Говоркова В. А., В. М. Катцов, В. П. Мелешко, Т. В. Павлова, И. М. Школьник (2008). Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 5—19.

Кислов А. В., В. М. Евстигнеев, С. М. Малхазова, Н. Н. Соколихина, Г. В. Суркова, П. А. Торопов, А. В. Чернышев, А. Н. Чумаченко (2008). Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. — М.: МАКС ПРЕСС. 290 с.

Мелешко В. П., В. М. Катцов, В. А. Говоркова, П. В. Спорышев, И. М. Школьник, Б. Е. Шнееров (2008). Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3. — Метеорология и гидрология, № 9, с. 5—21.

Михайлов В. Н., Добровольский А. Д., Добролюбов С. А. (2005). Гидрология. — М.: Изд-во МГУ. — 464 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II. Последствия изменения климата (2008). — М.: изд. Росгидромета. — 288 с.

Шикломанов И. А., Линз Г. (1991). Влияние изменений климата на гидрологию и водное хозяйство. — *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 51—60.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*: IPCC, Geneva, Switzerland. 104 p.

Kattsov V., Govorkova V., Pavlola T., Sporishev P. (2008). Arctic river runoff in the context of global warming-projections with state-of-the-art global climate models. *WCRP/SCAR/IASC Climate and Cryosphere Newsletter*. — *Ice and Climate News*, № 11.

УДК 551.521.31

**ПОСТУПЛЕНИЕ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ
НА ПРИЕМНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ГЕЛИОУСТАНОВОК
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

*В. В. Стадник, Л. М. Псаломщикова, О. В. Трофимова,
И. Н. Шанина*

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

Поступила в редакцию 15.02.2010
Поступила после доработки 10.03.2010

Для решения многих задач, связанных с проектированием и эксплуатацией различных сооружений, при оценке энергетических возможностей района требуется знание особенностей радиационного режима, в том числе радиационного режима наклонных поверхностей. Оценка поступления солнечной радиации на наклонные поверхности гелиоприемников позволяет реально оценить эффективность работы гелиоустановок в различных климатических условиях России.

Исследования показали, что приход солнечной радиации на наклонные поверхности можно определять по значениям солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, используя соответствующие модели или эмпирические связи (НПС, 1990; Кондратьев и др., 1958; Нау, 1986; Klucher, 1979).

В ранее выполненной работе Стадник, Разгоняева (2008) изложены методы расчета суммарной, прямой и рассеянной радиации, поступающей на наклонные поверхности, и приведены осредненные по широтам относительные значения суммарной радиации, которые могут использоваться как коэффициенты пересчета радиации с горизонтальной поверхности на наклонную.

В данной работе приводятся результаты анализа годовых и суточных сумм солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности (гелиоприемники) при реальной облачности в течение года, и распределение их по территории России. Рассматри-

ваются две поверхности: следящая за Солнцем, которая получает максимальное количество солнечной энергии, поскольку солнечные лучи всегда направлены по отношению к ней перпендикулярно, и ориентированная на юг с углом наклона, равным широте места. Эти характеристики приходящей радиации наиболее часто используются в гелиотехнических расчетах.

Анализ суточных и годовых сумм суммарной радиации показывает, что наибольшее количество радиации поступает на следящую за Солнцем поверхность. Поверхность с неизменным углом наклона, равным широте места, в целом за год получает суммарной радиации больше, чем горизонтальная поверхность, но в течение года поступление ее на эту поверхность не всегда бывает оптимальным. В весенние и летние месяцы суточный приход суммарной радиации на следящую поверхность на 30—50 % больше, чем на поверхность с углом наклона $\alpha = \varphi$.

Суточный приход суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности, имеет большой диапазон изменения как по территории, так и в течение года (табл. 1 и 2).

В январе распределение радиации, поступающей на поверхность, следящую за Солнцем и наклоненную на угол, равный широте места, происходит в соответствии с изменением поступления радиации на горизонтальную поверхность (Пивоварова, Стадник, 1981). Суммарная радиация возрастает с севера на юг от 0 до 15—20 МДж/м² вслед за увеличением высоты Солнца. В зимний период различия в суточном приходе радиации между рассматриваемыми поверхностями даже в южных районах не превышают 15—20 %.

В весенний период преимущество в облучении следящей за Солнцем поверхности выражено более резко и увеличивается от месяца к месяцу. Так, если в марте суточные суммы на следящую за Солнцем поверхность превышали значения на поверхность с углом наклона $\alpha = \varphi$, как и в январе, на 15—20 %, то в мае разность возросла до 30—40 %.

Характерной особенностью суточного прихода суммарной радиации на наклонные поверхности в апреле—мае является увеличение его с запада на восток от 18 до 36 МДж/м² на следящую

Таблица 1

Средние суточные суммы суммарной солнечной радиации (МДж/м²), поступающей на следящую за Солнцем поверхность

Станция	φ° с. ш.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Диксон	73,5	0,0	2,3	16,5	33,0	33,1	28,1	25,9	15,4	7,1	3,0	0,0	0,0
Среднеколымск	67,5	0,5	6,2	25,5	37,5	38,3	30,6	29,5	20,3	12,5	8,3	2,1	0,0
Верхоянск	67,6	0,5	6,4	22,9	34,0	34,1	36,7	32,5	23,4	13,8	8,6	2,3	0,0
Архангельск	64,6	1,3	5,2	13,3	21,1	26,4	29,8	29,9	19,5	10,1	4,7	1,4	0,4
Якутск	62,0	3,1	12,5	26,7	32,5	29,8	34,5	32,2	25,5	18,4	10,2	5,7	1,4
Воейково	60,0	3,0	7,4	16,4	20,3	28,1	32,2	28,9	21,9	14,9	6,5	2,7	1,5
Верхнее Дуброво	56,7	6,6	13,3	20,5	24,8	27,1	28,7	27,6	22,4	15,4	8,4	5,7	4,6
Нижний Новгород	56,3	3,5	9,1	16,2	20,7	26,6	31,2	27,9	23,5	14,7	7,6	3,4	2,1
Москва	55,7	4,3	10,0	16,2	19,2	25,1	30,3	27,1	21,9	14,9	7,7	4,1	2,7
Омск	55,0	11,6	14,5	21,5	25,0	28,1	31,4	29,5	23,8	18,7	9,7	6,5	5,5
Самара	53,3	6,8	13,0	17,4	22,0	29,7	29,9	28,5	25,9	18,6	9,8	4,4	4,4
Петропавловск-Камчатский	53,1	16,3	16,0	23,6	26,1	24,2	24,5	22,4	21,0	20,3	16,6	13,3	9,1
Иркутск	52,3	8,7	16,2	23,5	25,5	27,3	29,1	26,7	24,0	20,8	16,0	9,4	5,8
Хабаровск	48,5	17,5	21,0	27,6	23,4	26,0	26,0	25,5	23,6	22,3	18,8	16,6	11,6
Южно-Сахалинск	46,9	13,5	18,8	22,4	22,3	22,9	22,7	19,8	18,7	20,2	15,9	12,3	10,6
Астрахань	46,5	9,4	13,4	18,7	24,8	30,8	34,1	32,4	31,0	26,0	17,8	0,0	0,0
Краснодар	45,1	8,0	10,7	15,1	19,0	24,4	27,9	28,3	24,9	21,2	14,9	0,0	0,0
Сад-Город	43,3	20,6	24,5	26,0	23,2	25,0	21,0	19,5	19,9	23,3	21,9	0,0	0,0

Таблица 2

Средние суточные суммы суммарной радиации (МДж/м²), поступающей на поверхность, наклоненную на угол, равный широте места

Станция	φ° с. ш.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Диксон	73,5	0,0	0,0	13,5	22,2	19,9	13,7	11,2	9,6	5,8	2,8	0,0	0,0
Среднеколымск	67,5	0,5	5,6	21,3	26,4	20,2	16,1	14,2	13,5	10,0	7,2	1,9	0,0
Верхоянск	67,6	0,5	5,8	18,5	24,5	18,5	15,4	14,7	15,3	10,9	7,5	1,9	0,0
Архангельск	64,6	1,2	4,7	11,3	15,6	15,5	14,7	15,7	13,3	8,1	4,1	1,3	0,3
Якутск	62,0	2,8	10,8	21,3	23,5	18,0	18,1	17,7	16,8	14,1	8,8	5,0	1,3
Воейково	60,0	2,7	6,5	13,5	14,9	17,3	17,9	17,2	15,2	11,8	5,7	2,5	1,3
Верхнее Дуброво	56,7	5,7	11,4	16,9	18,9	17,5	17,2	17,0	15,7	12,3	7,5	5,1	4,1
Нижний Новгород	56,3	3,3	8,0	13,6	16,0	17,6	18,2	17,4	16,9	12,0	6,6	3,1	1,9
Москва	55,7	3,9	8,6	13,6	14,8	16,9	18,2	16,7	15,8	12,0	6,8	3,7	2,4
Омск	55,0	6,5	12,5	17,6	19,0	18,7	18,8	18,3	16,9	14,7	8,5	5,9	5,0
Самара	53,3	5,9	11,1	14,6	16,7	19,6	18,2	18,1	18,1	14,7	8,4	4,0	3,9
Петропавловск-Камчатский	53,1	8,6	12,0	19,2	20,2	16,8	16,2	15,4	15,3	15,8	11,7	11,1	7,6
Иркутск	52,3	7,5	13,7	18,9	18,9	18,3	18,1	17,4	17,2	16,2	13,3	8,1	5,1
Хабаровск	48,5	14,2	19,5	21,9	18,4	18,8	18,6	17,1	17,8	17,1	15,2	13,5	11,9
Южно-Сахалинск	46,9	11,3	15,6	18,7	17,6	16,8	15,9	14,9	14,7	16,1	13,2	10,4	8,9
Астрахань	46,5	8,0	11,2	15,4	18,8	20,8	21,2	20,6	21,7	20,0	14,6	8,3	5,1
Краснодар	45,1	6,9	9,4	12,8	15,2	18,2	18,8	19,3	18,5	17,0	12,8	7,2	4,4
Сад-Город	43,3	16,4	19,6	20,8	18,2	18,3	15,8	15,1	15,4	18,2	17,6	15,6	14,5

поверхность и от 15 до 26 МДж/м² на поверхность с наклоном $\alpha = \varphi$, что соизмеримо с изменением радиации с севера на юг. Высокий суточный приход суммарной радиации на северо-востоке страны обусловлен большой продолжительностью дня, небольшой облачностью, высокой прозрачностью атмосферы и большим альбедо подстилающей поверхности, увеличивающим поступление отраженной радиации на наклонную поверхность. Минимальный приход суммарной радиации характерен для западных областей европейской части России, находящихся под влиянием влажных воздушных масс, поступающих с Атлантики.

Аналогичные особенности распределения характерны и для суточных сумм суммарной радиации, приходящей в весенний период на горизонтальную поверхность.

В летний период разница в облучении следящей за Солнцем поверхности и поверхности с углом наклона $\alpha = \varphi$ становится еще больше, особенно в северных районах, где она достигает 55 %.

Большие различия, причем разнонаправленные, наблюдаются при сравнении радиации, приходящей на наклонные поверхности и на горизонтальную поверхность. Следящая за Солнцем поверхность получает суммарной радиации почти в 1,5 раза больше, чем горизонтальная, а наклоненная под углом, равным широте места, — значительно меньше. В северных районах, на широте 65—70°, радиация, приходящая на наклонную поверхность, составляет только 30—35 % приходящей на горизонтальную поверхность, поскольку при большой высоте Солнца угол, под которым солнечные лучи падают на поверхность, мал и лучи как бы скользят по ней.

Такие разные условия облучения рассматриваемых поверхностей отражаются на распределении суточного прихода радиации по территории.

В изменении по территории суточных сумм радиации, поступающей на поверхность с углом наклона $\alpha = \varphi$, сохраняется принцип зональности — достаточно равномерное возрастание от 10—12 МДж/м² на севере до 20—21 МДж/м² на юге. Однако в связи с развитием муссонной циркуляции и, следовательно, с увеличением облачности в летние месяцы даже в южных при-

брежных районах Дальнего Востока суточный приход суммарной радиации не превышает 14—16 МДж/м².

Изменение радиации, поступающей на следящую за Солнцем поверхность, происходит преимущественно в меридиональном направлении — от 26—27 МДж/м² в западных областях европейской части до 32—33 МДж/м² на северо-востоке страны. В прибрежных районах Дальнего Востока также наблюдается уменьшение суточного прихода суммарной радиации на следящую за Солнцем поверхность.

Осенью различия в суточном приходе суммарной радиации незначительны и характер ее распределения по территории практически одинаков. В октябре на общем фоне увеличения прихода радиации с севера на юг от 2 до 20 МДж/м² для одной поверхности и от 2 до 16 МДж/м² для другой отмечается существенное нарушение широтного хода суточных сумм суммарной радиации в умеренных широтах. Здесь увеличение суточного прихода радиации происходит с юго-запада на северо-восток. Так, суточный приход суммарной радиации в центральных областях европейской части России на широте 52—55° с. ш. и в азиатской части России на широте Северного полярного круга практически одинаков и составляет 8—10 МДж/м².

В течение года максимум прихода суммарной солнечной радиации на обращенную к югу поверхность, наклоненную под тем или иным углом, наблюдается в месяцы, когда сочетаются оптимальные условия облучения — высота Солнца, продолжительность дня и небольшая облачность (Пивоварова, 1973).

Максимальное поступление суммарной радиации на поверхность, следящую за Солнцем, должно наблюдаться в июне, когда высота Солнца максимальна. Однако зачастую облачность и наличие снежного покрова перекрывают влияние астрономического фактора, и это приводит к смещению максимума поступающей радиации на другие месяцы (рис. 1).

На территории Сибири севернее 65—67° с. ш. максимальный суточный приход радиации наблюдается в мае и составляет 33—38 МДж/м², что больше, чем в это время в Краснодарском крае. Такой высокий приход радиации в весенние месяцы достигается

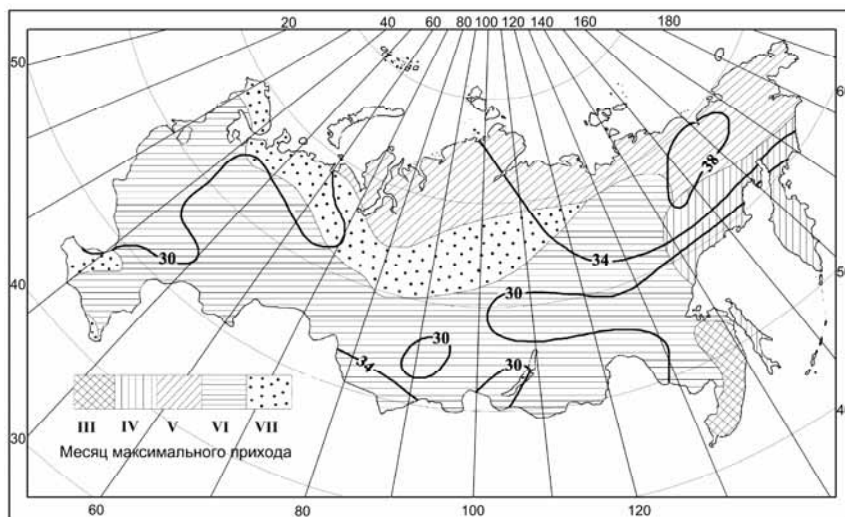


Рис. 1. Средняя суточная сумма суммарной радиации (МДж/м²), приходящей на следящую за Солнцем поверхность в месяц максимального прихода.

благодаря сочетанию условий, о которых говорилось выше: большой продолжительности дня, высокого альбедо, небольшой облачности. Следует отметить, что в прибрежных районах северных морей после окончания полярной ночи происходит быстрое увеличение прихода солнечной радиации. Особенно это проявляется в период с марта по апрель, когда суточный приход радиации возрастает вдвое. Так же резко происходит уменьшение суточного прихода радиации от августа к сентябрю.

При продвижении к югу максимальный суточный приход радиации смещается на летние месяцы. На всей обширной территории к югу от 60—65° с. ш. за исключением прибрежных районов Дальнего Востока максимум приходится на июнь, когда высота Солнца наибольшая, и только на севере европейской части России и севере Западной Сибири — на июль, когда наблюдается наименьшая облачность.

В Приморье летний муссон резко снижает суточный приход радиации в июне и июле, и в годовом ходе суммарной радиации обра-

зуются два максимума в соответствии с особенностями циркуляции. Главный максимум приходится на март, когда в условиях зимнего муссона преобладает малооблачная погода, а второй максимум, меньший по величине, — на сентябрь, что связано с прекращением влияния летнего муссона. На побережье Охотского моря, Камчатке и Сахалине максимальный приход суммарной радиации отмечается в апреле. На Сахалине, так же как и в Приморье, в годовом ходе наблюдается повышенный приход радиации в сентябре.

Суточный максимум суммарной радиации, поступающей на поверхность с углом наклона $\alpha = \varphi$, на 10—15 МДж/м² меньше, чем в случае следящей за Солнцем поверхности, и наблюдается на азиатской части страны в основном не в летний период, а весной, чаще всего в апреле (рис. 2). На юге Забайкалья, в Хабаровском крае и в Приморье он смещается на март, совпадая со временем с зимним муссоном, на полуострове Таймыр — на май, когда за счет снежного покрова в суммарный приход радиации большую добавку вносит рассеянная и отраженная радиация.

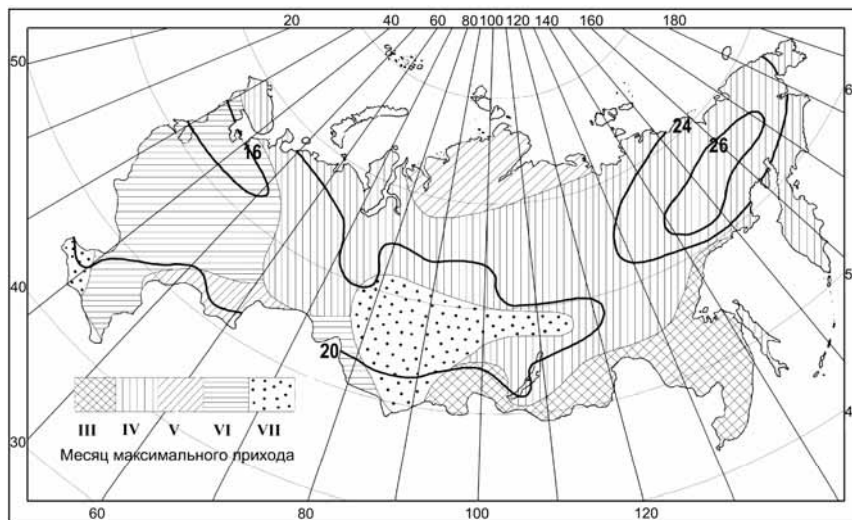


Рис. 2. Средняя суточная сумма суммарной радиации (МДж/м²) на поверхность с углом наклона, равным широте места, в месяц максимального прихода.

В Кузбассе и южных районах Красноярского края суточный максимум приходится на июль в связи с уменьшением в этот период облачности.

На европейской части страны максимальное поступление радиации на поверхность с углом наклона $\alpha = \varphi$ наблюдается преимущественно в июне при максимальной высоте Солнца и лишь в отдельных небольших районах смещается на апрель (Кольский полуостров), май (юг Поволжья) или июль (юг Краснодарского края) в связи с уменьшением количества облаков.

На приведенных картах четко прослеживается возрастание среднего суточного максимума суммарной радиации с запада на восток. Наибольшие значения, как уже отмечалось, характерны для северо-восточных районов России: более 38 МДж/м² на следящей поверхности и более 26 МДж/м² на поверхности с углом наклона, равным широте места. В западной половине европейской части России и на Дальнем Востоке к югу от широты 60° суточные максимумы прихода суммарной радиации на следящую поверхность несколько снижены (менее 30 МДж/м²). Минимальный суточный приход суммарной радиации на поверхность с углом наклона $\alpha = \varphi$ на северо-западе европейской части России составляет 16 МДж/м² и является самым низким для России.

На рис. 3 представлено распределение годовых сумм суммарной радиации для обеих рассматриваемых поверхностей и для сравнения приведено соответствующее распределение для горизонтальной поверхности. В распределении по территории годовых сумм радиации, приходящей на эти три поверхности, прослеживается общая закономерность, проявляющаяся в увеличении прихода радиации с севера на юг и значительном увеличении годовых сумм в северо-восточных районах страны.

Годовая сумма суммарной радиации на наклонную поверхность определяется, главным образом, количеством поступающей прямой солнечной радиации. Вклад прямой радиации в суммарную по месяцам и за год приведен в табл. 3. Для ряда станций, расположенных в различных физико-географических районах, вклад рассеянной и отраженной радиации в годовую сумму приведен в ранее опубликованной работе Стадник, Разгоняева (2008).

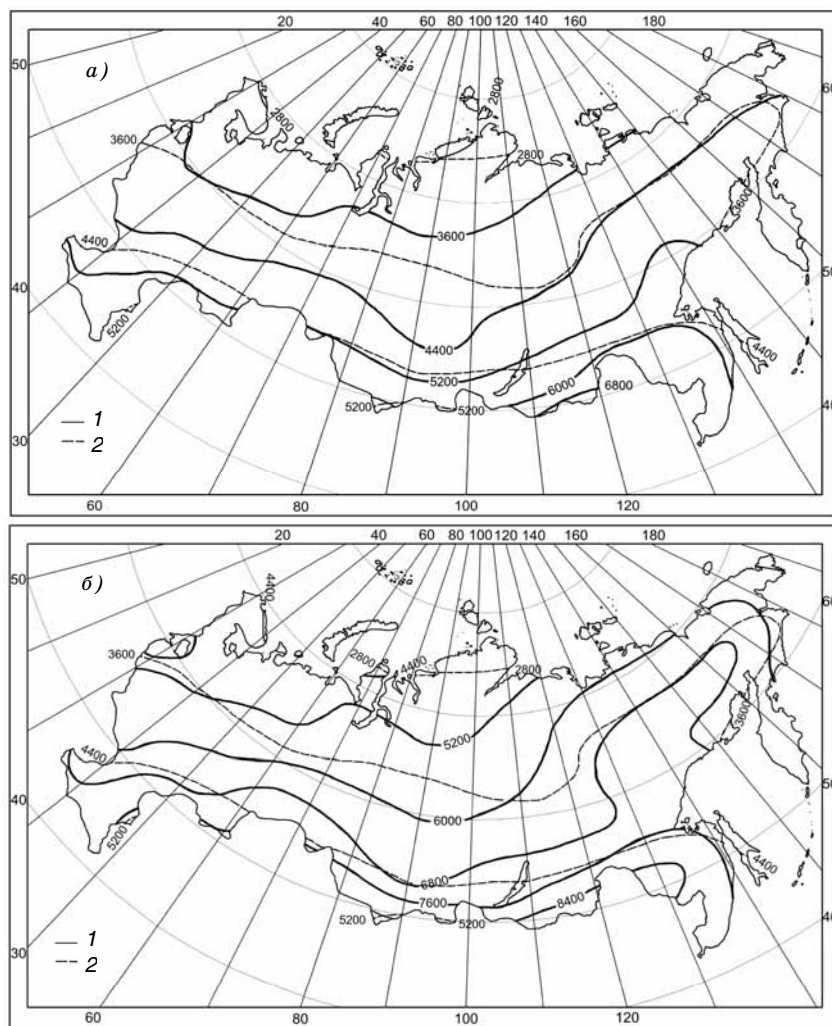


Рис. 3. Годовая сумма суммарной солнечной радиации (МДж/м²), приходящей на поверхность с углом наклона, равным широте места (а) и на поверхность, следящую за Солнцем (б), в сравнении с приходящей на горизонтальную поверхность.

1 — наклонная (а) и следящая за Солнцем (б) поверхности, 2 — горизонтальная поверхность.

Таблица 3

Вклад (%) прямой радиации в суммарную

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
	<i>Следящая за Солнцем поверхность</i>												
Диксон	57	58	55	40	46	59	57	53	53	53			52
Якутск	52	61	64	66	69	70	69	68	68	60	58	50	66
Москва	53	56	55	59	62	64	61	62	62	60	63	56	61
Краснодар	62	58	60	60	61	63	65	67	69	68	67	58	64
Сад-Город	68	67	66	62	62	54	54	59	70	73	72	68	65
	<i>Поверхность с углом наклона $\alpha = \varphi$</i>												
Диксон	55	55	46	18	16	32	44	47	47	51			36
Якутск	50	59	62	57	58	60	62	64	64	56	57	46	53
Москва	50	53	51	52	52	51	53	57	57	55	59	52	53
Краснодар	58	53	55	54	53	54	60	64	64	64	61	51	58
Сад-Город	68	66	63	56	54	44	51	65	65	70	71	68	60

Из табл. 3 видно, что в суммарном приходе радиации на обе рассматриваемые поверхности при средних условиях облачности основную долю составляет прямая радиация.

Вклад прямой радиации в случае следящей за Солнцем поверхности составляет в среднем 55 % зимой и 65 % летом. В случае неподвижной поверхности с углом наклона, равным широте места, вклад прямой радиации в суммарном приходе определяется не только условиями облачности, но и углом, под которым солнечные лучи падают на неподвижную в течение года поверхность. В связи с этим доля прямой радиации в суммарном приходе на такую поверхность уменьшается. Наименьший вклад прямой радиации отмечается летом на Крайнем Севере (16—20 %). Следует отметить также уменьшение доли прямой радиации летом в муссонной области на Дальнем Востоке, обусловленное большим количеством облаков.

Как было отмечено ранее (Стадник, Разгоняев, 2008), поверхность, следящая за Солнцем, в течение всего года получает прямой радиации больше, чем горизонтальная поверхность. Поверхность с углом наклона, равным широте места, так же как и вертикальная, не имеет этого преимущества в летние месяцы, получая лишь 80—90 % прямой радиации, поступающей на горизонтальную поверхность (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что годовой ход прямой радиации, приходящей на следящую за Солнцем поверхность, во всех районах аналогичен ее годовому ходу в случае горизонтальной поверхности. Поступление радиации на эти поверхности определяется одними и теми же факторами — широтой места, количеством облаков и в некоторой степени прозрачностью атмосферы. Количество радиации, приходящей на неподвижно закрепленные наклонные и вертикальные поверхности, кроме перечисленных выше факторов, зависит от угла, под которым солнечные лучи падают на поверхность. В северных районах угол наклона $\alpha = \varphi$ достаточно велик, и суточный приход прямой радиации на поверхность с таким углом наклона близок к ее приходу на вертикальную поверхность ($\alpha = 90^\circ$) (Пивоварова, 1973). С уменьшением широты и соответственно с увеличением высоты Солнца количество пря-

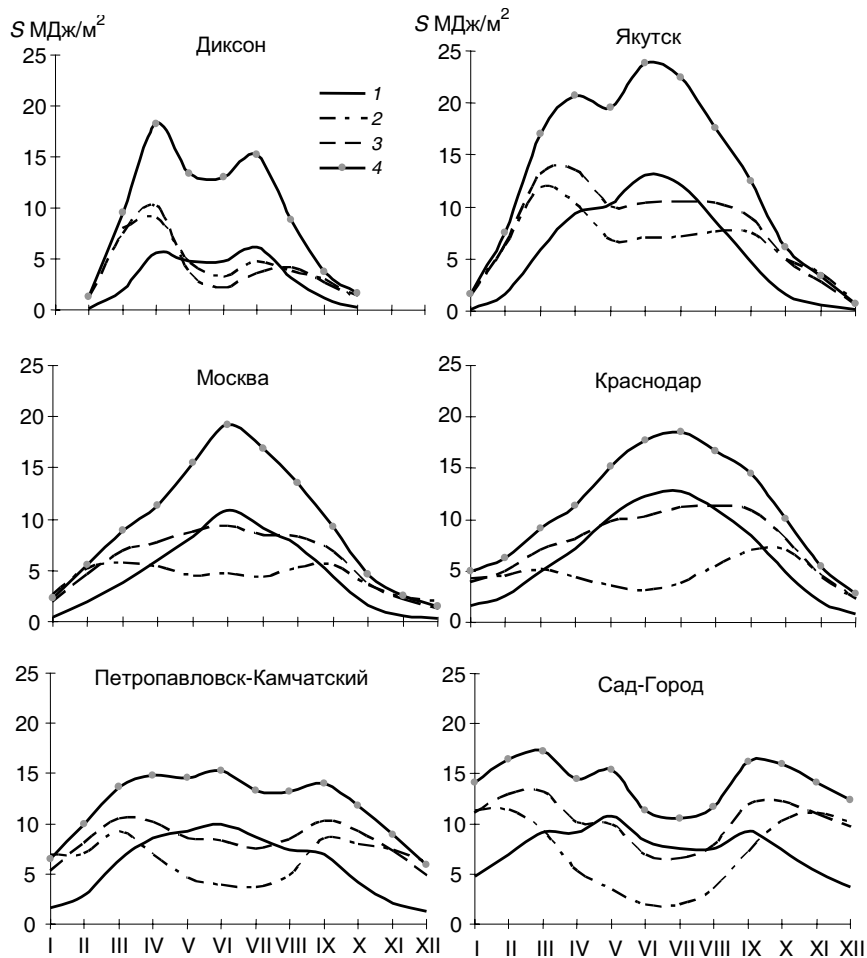


Рис. 4. Годовой ход средних суточных сумм прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность (1) и на поверхности с различными углами наклона: вертикальную (2), с углом наклона, равным широте места (3), следящую за Солнцем (4).

мой радиации, приходящей на вертикальную поверхность, уменьшается, а в случае наклонной поверхности увеличивается. Однако в зимние месяцы, при малой высоте Солнца, когда при-

ход радиации на любую поверхность определяется, главным образом, астрономическим фактором, количество радиации практически одинаково на всех поверхностях, включая следящую за Солнцем.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-05-13507-офи_ц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова М. П. (1978). Радиационный режим наклонных поверхностей. — Л.: Гидрометеиздат. — 215 с.

Научно-прикладной справочник по климату СССР (НПС) (1990). Серия 3, части 1—7, вып. 1-34. — Л.: Гидрометеиздат.

Пивоварова З. И. (1973). Характеристика радиационного режима на территории СССР применительно к запросам строительства. — Труды ГГО, вып. 321. — 127 с.

Пивоварова З. И., Стадник В. В. (1981). Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии. — Л.: Гидрометеиздат. — 292 с.

Стадник В. В., Разгоняев Ю. В. (2008). Оценка суммарного прихода суммарной радиации, поступающей на наклонные поверхности. — Труды ГГО, вып. 557, с. 67—84.

Hay J. E. (1986). Calculation of solar irradiances for inclined surfaces: validation of selected hourly and daily models. — Atmosphere and Ocean, 24, p. 16—41.

Klucher T. M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. — Solar Energy, 23, p. 111—114.

УДК 551.58

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ЗЕМЛИ,
ДОСТАВЛЯЕМОГО ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ**

Д. В. Смирнов

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

Поступила в редакцию 27.01.2010
Поступила после доработки 1.04.2010

Одним из видов возобновляемых источников энергии является низкопотенциальное тепло грунта или воды. Этот вид энергии извлекается из грунта или воды посредством тепловых насосов.

Цель работы — установить зависимость количества энергии, генерируемой тепловыми насосами на основе низкопотенциального тепла Земли, от климатических условий и определить наиболее благоприятные районы для применения тепловых насосов.

Принцип действия теплового насоса (Васильев, 2006; Васильев и др., 2001) аналогичен принципу функционирования холодильника. Хладагент, находящийся в жидком состоянии, попадает в земляной контур. Имея очень низкую температуру кипения, он переходит в газообразное состояние. Газ попадает в компрессор, на работу которого затрачивается электроэнергия. В компрессоре газ сжимается до состояния высокого давления, и хладагент разогревается. Далее разогретый газ попадает в теплообменник, где передает свое тепло воде, используемой для бытовых нужд, и отопительной системе дома. При падении давления и понижении температуры хладагент переходит в жидкое состояние и снова возвращается в земляной контур. Цикл повторяется.

Тепловые насосы различаются по мощности и способу установки земляных контуров: вертикально, горизонтально и по диагонали. Для того чтобы определить мощность устанавливаемого теплового насоса, необходимо рассчитать теплопотери дома. В настоя-

щей работе для типового здания (площадью 200 кв. м) рассчитаны теплопотери через стены, окна, пол и крышу. Теплопотери рассчитывались для преобладающей суточной температуры воздуха зимой (-11 и -22 °С) и летом (18 °С) по известной методике (Анапольская, Гандин, 1973). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Теплопотери типового здания

Температура, °С	-22	-11	18
Теплопотери, кВт	9,395	7,296	0

По значениям теплопотерь, приведенным в таблице, был выбран наиболее подходящий по установленной мощности ($10,6$ кВт) тип теплового насоса. После выбора теплового насоса необходимой мощности для конкретного здания следует найти точку баланса системы. Точка баланса показывает, при какой температуре наружного воздуха теплопотери дома равны производительности теплового насоса (рис. 1).

Из рисунка видно, что выбранная температура воздуха (-11 и -22 °С) ниже температуры точки баланса, поэтому тепловой насос автоматически потребляет дополнительную электроэнергию, идущую на работу электрического тэна, который входит в комплект теплового насоса (табл. 2).

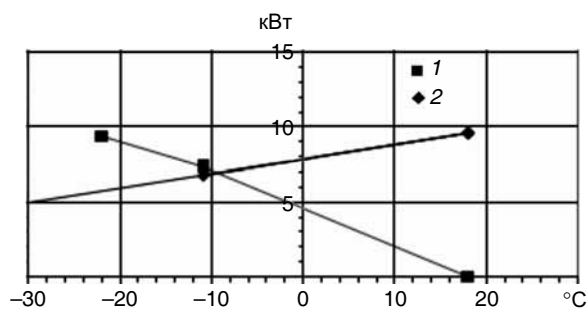


Рис. 1. Определение точки баланса.

1 — теплопотери здания, 2 — мощность теплового насоса.

Таблица 2

Потребляемая дополнительная энергия

Температура, °С.....	-22	-11
Энергия, кВт.....	2,4	0,5

Насос, потребляя дополнительную электроэнергию, продолжает вырабатывать постоянное количество тепла. Вследствие этого несколько снижается КПД системы. Рассчитано, что при температуре $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ тепловой насос дополнительно потребляет в среднем 0,5 кВт электроэнергии, а при температуре $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ — в среднем 2,4 кВт.

По данным о повторяемости значений среднесуточной температуры -11 и $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ за периоды 1985—2000 и 2045—2065 г. построены карты. Исходная информация о среднесуточной температуре воздуха получена с помощью ансамбля из семи моделей МОЦАО (Мелешко, Катцов и др., 2008).

Несмотря на ряд неопределенностей, свойственных результатам моделирования, карты отображают распределение климатических ресурсов низкопотенциального тепла Земли на территории России, не занятой вечной мерзлотой. Климатические ресурсы определяются повторяемостью температур от -11 до $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исходя из этого автор построил карты среднего числа дней в году с температурой воздуха $\leq -11\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\leq -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, 3).

Из рисунков видно, что в целом для территории России число дней с температурами $\leq -11\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\leq -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается с юго-запада на северо-восток.

Необходимо также отметить, что в условиях вечной мерзлоты теплонасосные установки не применяются в силу того, что хладагент, находящийся в земляных контурах, не сможет должным образом испаряться, а следовательно, не сможет работать вся система отопления.

Наименее благоприятные районы по данным характеристикам располагаются в Забайкалье и вблизи границы с вечной мерзлотой. Более благоприятные условия для установки тепловых насосов по имеющимся характеристикам наблюдаются на всей территории Восточно-Европейской равнины, кроме северо-восточной ее части, на юге Сибири, а также на Дальнем Востоке.

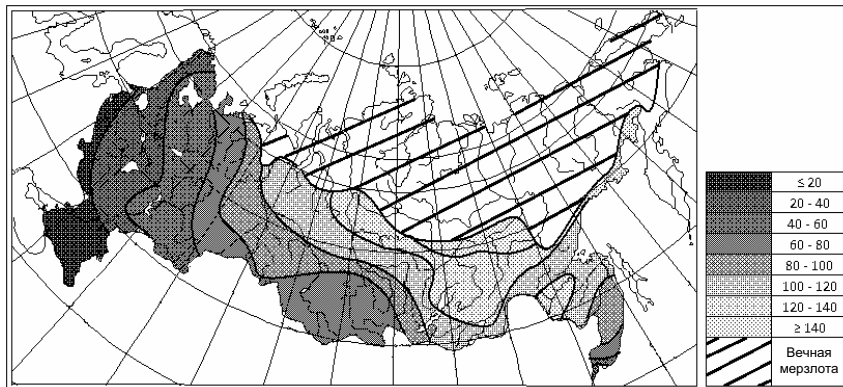


Рис. 2. Среднее число дней в году с температурой ≤ -11 °C за период 1985—2000 гг.

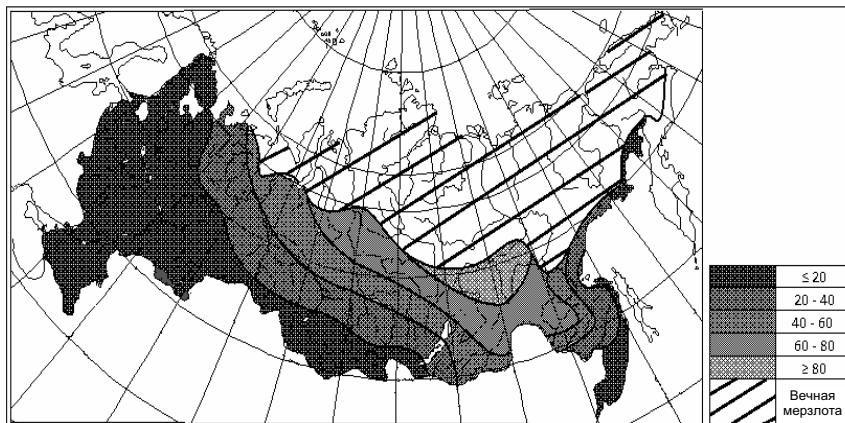


Рис. 3. Среднее число дней в году с температурой ≤ -22 °C за период 1985—2000 гг.

Для того чтобы проследить, каким образом изменится количество климатических ресурсов для использования низкопотенциального тепла, в XXI веке построены соответствующие карты ожидаемых температур воздуха на середину XXI века (рис. 4, 5).

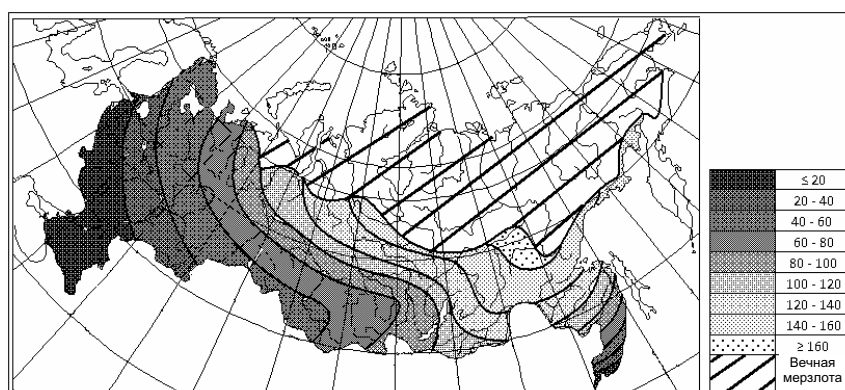


Рис. 4. Среднее число дней в году с температурой ≤ -11 °C на середину XXI века (2045—2065 гг.).

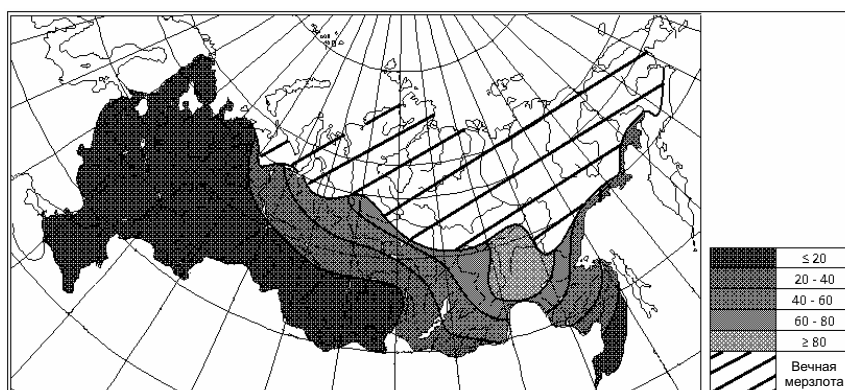


Рис. 5. Среднее число дней в году с температурой ≤ -22 °C на середину XXI века (2045—2065 гг.).

Из рисунков видно, что в целом характер распределения по территории страны среднего числа дней в году с выбранными температурами такой же, как и в настоящее время, т. е. повторяемость выбранных критических температур увеличивается с юго-запада на северо-восток. В европейской части России и на

юге Сибири число дней в году с температурами ≤ -11 °С и ≤ -22 °С уменьшилось. Таким образом, можно сказать, что использование тепловых насосов в качестве отопительных систем к середине 21-го века станет несколько более выгодным на всей территории России (без зоны вечной мерзлоты), кроме Забайкалья.

На основе полученных данных можно оценить вклад энергии низкопотенциального тепла Земли в общий энергетический баланс и долю потребляемой энергии, которую могут обеспечить тепловые насосы. Для достижения поставленной цели следует рассчитать и сопоставить теплотери здания и выработку тепла насосом при преобладающих температурах воздуха в зимний период. В районах с наиболее низкой зимней температурой воздуха, например в Забайкалье, теплотери выбранного стандартного здания составляют 25 231 кВт/ч (СНиП 2.04.05-91, СНиП 23-01-99). Выработка тепловой энергии насосом равна 17 827 кВт/ч. Для ее расчета используются данные о производительности насоса при заданной температуре, дополнительных затратах энергии и повторяемости температур, снимаемые с карт. В данном районе доля энергии низкопотенциального тепла составляет 71 %. В районе Краснодарского края и Ставрополя при преобладающих температурах воздуха выше -11 °С эта доля достигает 98 %.

Проведенные исследования показывают целесообразность применения тепловых насосов для обеспечения теплом малоэтажных зданий в южных и юго-западных районах России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анапольская Л. Е., Гандин Л. С. (1973). Метеорологические факторы теплового режима зданий. — Л.: Гидрометеоздат, с. 134—148.

Васильев Г. П. (2006). Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. — М.: Изд. дом «Граница». «Красная звезда». — 220 с.

Васильев Г. П. и др. (2001). Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии. — М., изд. ГУП «НИИЦ». — 66 с.

Мелешко В. П., В. М. Катцов, В. А. Говоркова, П. В. Спорышев, И. М. Школьник, В. Е. Шнееров (2008). Климат России в XXI веке. Часть 3.

Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3. — Метеорология и гидрология, № 9.

СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование.

СНиП 23-01-99. Строительная климатология.

www.heatpumpcentre.org

www.agesystems.com

УДК 551.584

**СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
ПО УСЛОВИЯМ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА
КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА**

Н. А. Зиновьева, Г. Б. Пигольцина

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

Поступила в редакцию 17.02.2010
Поступила после доработки 24.03.2010

Введение

Метеорологические станции, расположенные на территории со сложным рельефом, отражают микроклиматические условия того элемента рельефа, в котором они находятся, и являются репрезентативными только для данного местоположения. При решении большинства задач микроклиматологии, в частности при количественной оценке изменчивости климатических показателей в условиях выраженной неоднородности подстилающей поверхности, необходимы достоверные сведения о местоположении конкретных метеорологических станций. Задача систематизации станций по местоположениям возникла при выполнении работы по микроклиматическому описанию и районированию горного участка территории проведения зимних Олимпийских игр «Сочи-2014», расположенного в районе Красной Поляны.

Основным источником получения сведений об особенностях местоположения станций является «История и физико-географическое описание метеорологических станций и постов» (Климатический справочник СССР, 1965). Однако на основании этого справочника можно получить лишь общее представление об окружающей станцию территории, поскольку характеристики местоположения метеорологических площадок зачастую не содержат достаточно подробных сведений о микроклиматообразующих факторах, влияющих на величину метеоэлементов; не

исключены также ошибки при составлении этих описаний. К тому же указанные описания, характеризующие местоположение станции до 1965 г., устарели.

Все вышеперечисленное, включая трудоемкий и длительный процесс выбора станций с определенным местоположением по указанным описаниям, приводит к довольно субъективной систематизации метеорологических станций по условиям местоположения для последующих микроклиматических расчетов и районирования.

Методика объективной систематизации метеорологических станций по местоположению

Оптимизировать проведение исследований, сократить время и усилия, затрачиваемые на изучение и анализ указанной выше информации, и получить объективную систематизацию метеорологических станций по местоположению возможно с помощью метода кластерного анализа, а физико-географические описания можно использовать для выборочной проверки полученных результатов. Обоснованность применения метода кластерного анализа для решения данной задачи определяется тем, что он позволяет производить систематизацию объектов не по одному параметру, а по целому набору признаков. Кроме того, кластерный анализ в отличие от большинства математико-статистических методов не накладывает никаких ограничений на вид рассматриваемых объектов и позволяет рассматривать множество исходных данных практически произвольной природы.

Существует большое число алгоритмов кластеризации. Для реализации задачи многомерной классификации метеорологических станций по условиям местоположения был выбран достаточно популярный в нашей стране пакет статистических программ STATISTICA версии 8.0 (Буреева, 2007; Вуколов, 2008). В этом пакете в модуле кластерного анализа представлено семь иерархических агломеративных методов. Посредством перебора всех возможных сочетаний методов и мер сходства было установлено, что для решения указанной задачи наилучшим сочетанием метода и меры сходства являются метод полной связи (Complete

Linkage) и расстояние городских кварталов (City-block (Manhattan) Distance) соответственно.

В настоящей работе рассматривалось 16 метеорологических станций, расположенных в условиях сложного (горного) рельефа Западного Кавказа. Кластеризация проводилась по двум параметрам: высоте станций над уровнем моря (H м) и среднему из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха (T_m °C). Выбор последнего климатического показателя определяется тем, что T_m (как и другие минимальные температуры), является одной из наиболее чувствительных к условиям местоположения характеристик термического режима, которая изменяется в довольно широком диапазоне в зависимости от характера подстилающей поверхности, формы рельефа, относительных превышений местности, условий стока холодного воздуха (Микроклимат СССР, 1967; Мищенко, 1984).

Поскольку рассматриваемые параметры имеют разные единицы измерения, то предварительно была произведена их нормировка, т. е. преобразование исходных данных в безразмерные величины. В пакете STATISTICA нормировка любой переменной выполняется по формуле

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma},$$

где Z — нормированное значение, x — исходное значение, \bar{x} и σ — среднее и среднее квадратическое отклонение соответственно.

Результаты кластерного анализа

Графическое отображение выполненного кластерного анализа представлено на рис. 1.

Обособленные кластеры объединяют станции с конкретными местоположениями и определенным термическим режимом, формирующимся под влиянием одного или нескольких микроклиматообразующих факторов. Дальнейшее объединение обособленных кластеров (или присоединение к ним отдельных станций) определяет кластеры, характеризующиеся однородными микро-

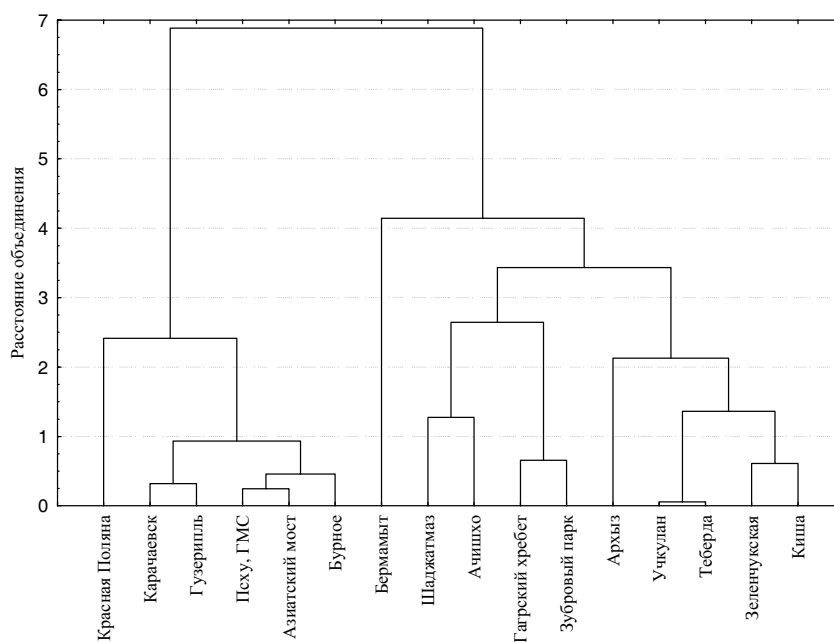


Рис. 1. Дендрограмма разбиения метеорологических станций по условиям местоположения методом полной связи.

климатическими условиями более крупного масштаба воздействия, т.е. определенным типом микроклимата, и т. д. Наличие отдельных станций, не образовавших обособленные кластеры, показывает, что в рассматриваемой группе нет станций с аналогичным местоположением.

Пошаговый процесс кластеризации производит последовательное объединение метеорологических станций в группы по степени воздействия микроклиматообразующих факторов на термический режим, которое позволяет получить информацию о местоположении станций на всех иерархических уровнях — от непосредственного локального воздействия (обособленные кластеры) до обобщенных типов микроклимата (объединенные и крупные кластеры). Таким образом, решается задача классификации станций и выявления в ней соответствующей структуры.

Пошаговое объединение станций в кластеры привело к образованию двух крупных кластеров. Первый включает станции Красная Поляна, Карачаевск, Гузерипль, Псху, ГМС, Азиатский мост, Бурное; второй – станции Бермамыт, Шаджатмаз, Ачишхо, Гагрский хребет, Зубровый парк, Архыз, Учкулан, Теберда, Зеленчукская, Киша.

Первый крупный кластер объединил станции, расположенные в горных долинах и котловинах в пределах высот от 566 м (Красная Поляна) до 861 м (Карачаевск), со значениями среднего из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха от –14 до –20 °С (табл. 1).

Таблица 1

Высота над уровнем моря (H), средний из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха (T_m) и характеристика местоположения метеорологических станций

Метеостанция	H м	T_m °С	Местоположение
<i>Крупный кластер 1</i>			
Азиатский мост	832	–18	Возвышенные места в нешироких (до 3 км) котловинообразных долинах, имеющих небольшой сток
Псху, ГМС	685	–18	
Бурное	747	–19	Очень узкая (до 0,5 км) долина, склон террасы
Гузерипль	668	–20	Котловинообразная узкая долина
Карачаевск	861	–20	Узкая (до 1 км) долина, имеющая небольшой сток
Красная Поляна	566	–14	Широкая (до 4 км) котловина, склон, поселок
<i>Крупный кластер 2</i>			
Теберда	1328	–22	Возвышенные места в нешироких (до 3 км) котловинообразных долинах, имеющих небольшой сток
Учкулан	1362	–22	
Киша	755	–23	Дно очень узкой (до 0,5 км) замкнутой долины

Окончание табл. 1

Метеостанция	H м	T_m °С	Местоположение
Зеленчукская	929	-24	Широкая (до 5 км) ровная котловина
Архыз	1456	-26	Обширная котловина (10 × 6 км)
Зубровый парк	1442	-18	Склоны гор с хорошим стоком холодного воздуха
Гагрский хребет	1644	-17	
Ачишхо	1880	-20	Верхняя часть склона
Шаджатмаз	2070	-23	Широкое открытое плато
Бермамыт	2583	-25	Вершина горы

Ко второму крупному кластеру относятся станции, расположенные в горных долинах и котловинах (Зеленчукская, Киша, Учкулан, Теберда, Архыз), с высотами над уровнем моря от 755 до 1456 м и значениями среднего из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха от -22 до -26 °С, а также станции, расположенные на склонах и вершинах гор (Зубровый парк, Гагрский хребет, Ачишхо, Шаджатмаз, Бермамыт), с высотой над уровнем моря от 1442 до 2583 м и значениями среднего из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха от -17 до -25 °С.

В условиях горного рельефа к репрезентативным по термическому режиму местоположениям, характеризующим фоновое распределение T_m с высотой, относятся склоны с хорошим воздухообменом и широкие открытые плато.

Метеостанции с этими местоположениями вошли в объединенный кластер (Зубровый парк, Гагрский хребет, Ачишхо, Шаджатмаз). На последнем этапе к ним присоединилась высокогорная станция Бермамыт, которая по микроклиматическим условиям близка к репрезентативным, но из-за своего местоположения на вершине горы и на большой высоте над уровнем моря не вошла непосредственно в указанный кластер.

Для выбранных таким образом репрезентативных станций была получена зависимость среднего из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха от высоты над уровнем моря и определены значения T_m на разных высотах (фоновые значения).

Затем были вычислены отклонения значений T_m рассматриваемых станций от фоновых, которые распределились в соответствии с кластерным разбиением станций (табл. 2).

Результаты кластеризации совпали с выбором репрезентативных станций вручную по физико-географическому описанию, что подтверждает правомерность применения кластерного анализа для систематизации метеорологических станций по местоположениям.

Таблица 2

Отклонение среднего из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха (ΔT_m) на метеорологических станциях от фоновых значений

Метеостанция	ΔT_m °C
Красная Поляна	-4,5
Теберда Учкулан	-6,0...-6,3
Азиатский мост Псху, ГМС	-6,3...-7,5
Бурное	-8,0
Гузерибль Карачаевск	-8,1...-9,7
Архыз	-9,2
Киша Зеленчукская	-11,5...-11,9

Обособленные кластеры позволяют формализовать известные закономерности микроклиматической изменчивости расчетных зимних температур воздуха в условиях сложного рельефа (Микроклимат СССР, 1967; Мищенко, 1984) для конкретной рассматриваемой территории (рис. 2).

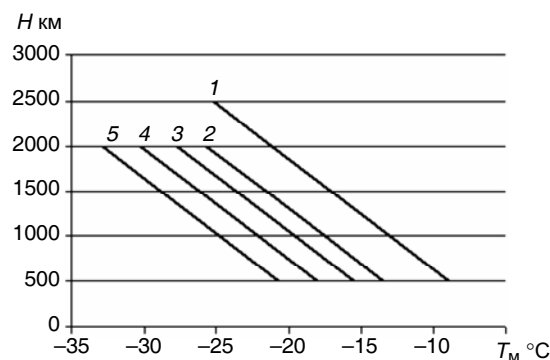


Рис. 2. Изменение среднего из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха (T_m) под влиянием местоположения в горах Западного Кавказа.

1 — склоны гор с хорошим воздухообменом, открытые горные плато; 2 — нижние части склонов широких (3—4 км) и котловинообразных долин, имеющих сток холодного воздуха; 3 — возвышенные места в нешироких (до 3 км) и котловинообразных долинах с затрудненным стоком холодного воздуха; 4 — узкие (до 1 км), извилистые долины; 5 — замкнутые части очень узких долин, котловины.

Полученные результаты были использованы для микроклиматического районирования горного района территории проведения зимних Олимпийских игр «Сочи-2014» (Пигольцина, Зинovieва, 2009).

Заключение

Все разработки, осуществляемые при мезо- и микроклиматическом районировании, связаны с оценкой местоположения используемых метеорологических станций, поэтому анализ местоположений метеорологических станций исследуемого региона является необходимым звеном в изыскательских работах. Предложенный способ разбиения станций по условиям местоположе-

ния с помощью кластерного анализа позволяет выполнить их объективную систематизацию и формализовать известные закономерности микроклиматической изменчивости для получения количественных значений микроклиматических поправок для конкретной территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буреева Н. Н. (2007). Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA» / Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Применение программных средств в научных исследованиях и преподавании математики и механики». — Нижний Новгород. — 112 с.

Вуколов Э. А. (2008). Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL / Учебное пособие. Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Форум. — 464 с.

Климатический справочник СССР (1965). Истории и физико-географические описания метеорологических станций и постов. Вып. 13. — Ростов-на-Дону.

Микроклимат СССР (1967) / Под ред. И. А. Гольцберг. — Л.: Гидрометеоиздат. — 284 с.

Мищенко З. А. (1984). Биоклимат дня и ночи. — Л.: Гидрометеоиздат. — 280 с.

Пигольцина Г. Б., Зиновьева Н. А. (2009). Микроклиматические особенности территории проведения зимних Олимпийских игр «Сочи-2014» и методы их оценки. — Труды ГГО, вып. 559, с. 56—75.

УДК 555.501.721

ВОЗМОЖНЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОРМУЛЫ СИВКОВА

И. В. Морозова

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

Поступила в редакцию 30.06.2009
Поступила после доработки 30.10.2009

Широко известен тот факт, что между суточными и месячными суммами солнечной радиации, поступающей на земную поверхность, и соответствующими значениями солнечного сияния существует тесная корреляционная зависимость.

Впервые В. Н. Украинцев (1939) выразил эту связь в виде линейного уравнения, которое использовал для расчета суточных и месячных сумм суммарной солнечной радиации (G) по данным о продолжительности солнечного сияния (S):

$$G = mS + n, \quad (1)$$

где m и n — коэффициенты, имеющие годовой и широтный ход.

Поскольку коэффициенты m и n были определены В. Н. Украинцевым по небольшому числу станций и для их получения были привлечены результаты недостаточно точных измерений суммарной солнечной радиации, в работе Барашковой и др. (1961) была проведена корректировка этих коэффициентов.

Для аналитического выражения зависимости месячных сумм суммарной солнечной радиации $G_{\text{мес}}$ от продолжительности солнечного сияния за месяц $S_{\text{мес}}$ С. И. Сивков (1961, 1968) рекомендовал использовать более совершенную формулу:

$$G_{\text{мес}} = 0,0049 \cdot S_{\text{мес}}^{1,31} + 10,5(\sin h_{\odot}^{2,1}). \quad (2)$$

В отличие от формулы, предложенной В. Н. Украинцевым, эта формула не содержит никаких локальных параметров, что значительно упрощает ее использование. Преимущество формулы Сивкова состоит также в применении функции полуденной высоты солнца на 15-е число месяца ($\sin h_{\odot}$), которая является косвенной характеристикой максимально возможного поступления суммарной солнечной радиации.

С. И. Сивков показал, что использование формулы (2) дает хорошие результаты не только при расчете средних многолетних месячных значений суммарной радиации, но и при определении месячных сумм за отдельные годы. Отклонения вычисленных средних многолетних сумм от измеренных в большинстве случаев не превышают 10 %, однако для отдельных лет увеличиваются до 20—30 %.

Формула (2) была рекомендована С. И. Сивковым для использования при критическом контроле сумм суммарной солнечной радиации на актинометрических станциях бывшего СССР, расположенных в широтной зоне 40—65° с. ш. (Сивков, Лебедева, 1961).

Для более северных районов — территории Кольского полуострова в широтной зоне 66—70° с. ш. — уточнения формулы (2) дал Г. В. Гирдюк (Гирдюк, 1965). С этой целью он на материале многолетних наблюдений на трех станциях провел для всех месяцев и года в целом сравнение месячных сумм суммарной радиации, полученных по результатам измерений, с рассчитанными по формуле Сивкова.

Как установил Г. В. Гирдюк, почти для всех месяцев года наблюдается превышение измеренных значений над рассчитанными. Наибольшие расхождения отмечены в период с марта по май. Это, по мнению автора, происходит за счет неучета при условии общего возрастания солнечного излучения в эти месяцы дополнительного прихода суммарной радиации, обусловленного отражением и рассеянием радиации снежной поверхностью.

В результате проведенного сравнения автором применительно к территории бывшего СССР в зоне 66—70° с. ш. были предложены поправки к средним многолетним суммам суммарной радиации, рассчитанным по формуле Сивкова (табл. 1).

Таблица 1

Поправки к формуле Сивкова

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Поправка	—	1,00	1,18	1,16	1,26	1,14	1,10	1,06	1,05	0,96	1,05	—

Примечание. Для станций Южного полушария поправки необходимо использовать в соответствии с сезонами этого полушария.

Цель исследования, которому посвящена настоящая работа, — оценить возможность использования формулы Сивкова применительно ко всей территории земного шара, поскольку автор получил ее, основываясь на материале регистрации суммарной солнечной радиации только 20 станций СССР, расположенных в зоне 40—65° с. ш., и только за один год наблюдений.

Эта задача возникла в связи с разработкой в Мировом центре радиационных данных (МЦРД, Россия, СПб) алгоритмов автоматизированного критического контроля результатов наблюдений за суммарной солнечной радиацией, поступающих в МЦРД с мировой радиометрической сети, в частности средних за месяц суточных сумм.

Самостоятельный интерес представляла возможность привлечения к апробированию формулы материалов многолетних наблюдений мировой сети, накопленных в МЦРД.

Обращение к формуле Сивкова при решении проблемы контроля было обусловлено тем, что МЦРД не располагает никакой дополнительной информацией, сопутствующей радиометрическим наблюдениям, кроме продолжительности солнечного сияния. Следует также отметить, что перечень радиационных параметров, по которым результаты наблюдений на станциях стран, участвующих в системе международного обмена радиационными данными, поступают в МЦРД, ограничен суммарной, рассеянной радиацией (суточные суммы) и радиационным балансом подстилающей поверхности (часовые суммы).

Для решения поставленной задачи были использованы данные о суммарной солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния 106 станций мировой сети за период наблюдений не менее 20 лет на каждой.

Станции подбирались таким образом, чтобы не только охватить различные по физико-географическим условиям области земного шара, но и по возможности наиболее полно представить весь диапазон широт. Естественно, что в полной мере осуществить это намерение не удалось, поскольку, во-первых, не все страны и станции, проводящие радиометрические наблюдения, представляют данные в МЦРД и, во-вторых, радиометрическая сеть достаточно редка в некоторых областях земного шара.

При анализе сравнивались средние за месяц суточные суммы суммарной радиации, полученные в результате наблюдений и рассчитанные по формуле (2). Для этой цели определялись относительные значения отклонений (ΔG) рассчитанных сумм (G_p) от измеренных ($G_{и}$):

$$\Delta G = \frac{G_p - G_{и}}{G_{и}} 100 \% . \quad (3)$$

Основные результаты проведенного анализа сводятся к следующему.

Расхождения средних многолетних значений суточных сумм суммарной радиации, полученных по данным наблюдений и расчетным путем, на станциях, расположенных в широтной зоне 60° с. ш. — 60° ю. ш., в подавляющем числе случаев не превысили 20 %. В тех случаях, когда расхождения оказались более 20 %, были установлены факты нарушения однородности рядов наблюдений.

В качестве примера на рис. 1 приведен фрагмент «широтного хода» отклонения рассчитанных значений от измеренных. Случай когда значения ΔG весьма существенно вышли за пределы 20 % (станция Маракайбо, Венесуэла, 1969 г.), проиллюстрирован графиком связи годовых значений суммарной радиации и продолжительности солнечного сияния.

Станции с неоднородными рядами наблюдений из дальнейшего анализа были исключены.

При анализе отклонений рассчитанных сумм суммарной радиации от измеренных привлек внимание тот факт, что несколько меньшие отклонения (до 15 %) характерны в этой широтной зоне

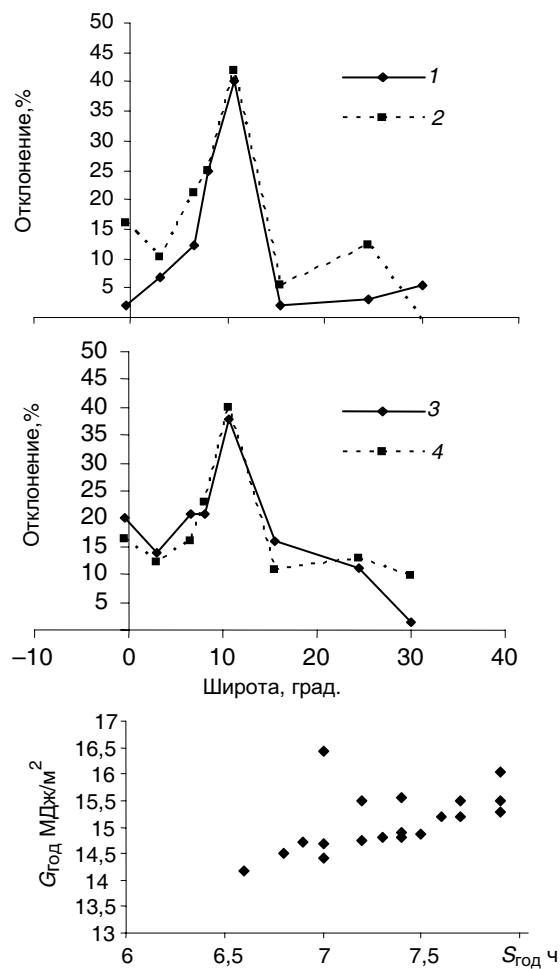


Рис. 1. Фрагмент широтного хода отклонений средних многолетних значений суточных сумм суммарной солнечной радиации, рассчитанных по формуле Сивкова, от значений, полученных по результатам измерений, и график связи средних годовых значений суммарной радиации и продолжительности солнечного сияния для станции, где отклонение для всех месяцев года составило 40 % и более.

1 — январь, 2 — апрель, 3 — июль, 4 — октябрь.

для станций, на которых при наблюдениях используют более совершенные приборы по сравнению с биметаллическим актинографом Робича и пиранометром Беллани.

В табл. 2 приведена повторяемость ΔG для центральных месяцев всех сезонов года в широтной зоне 60° с. ш. — 60° ю. ш. Как следует из этой таблицы, в 80—90 % случаев отклонение не превышает 15 % (по абсолютному значению), в 60—70 % случаев — 10 %.

Характерно, что приблизительно в зоне 35° с. ш. — 35° ю. ш. расчет по формуле Сивкова для всех рассмотренных месяцев дает завышенные значения по сравнению с измеренными. За пределами указанной широтной зоны наблюдается зависимость знака отклонения от сезона года.

Так, в Северном полушарии в январе отклонения в основном отрицательные, в июле — положительные. В апреле и октябре при увеличении широты станции, начиная с 35° с. ш., происходит постепенная смена знака (с плюса на минус): в апреле примерно на 55° с. ш., в октябре на 65° с. ш.

Для Южного полушария столь определенные выводы сделать трудно, так как зона южнее 35° ю. ш. весьма скудно освещена данными наблюдений, вообще, и в архиве МЦРД в частности.

Таблица 2

Повторяемость (%) отклонений рассчитанных средних многолетних значений суточных сумм суммарной солнечной радиации от измеренных

Отклонение, %	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
-24,9...-25,0		2		
-19,9...-15,0	2	—		2
-14,9...-10,0	7	—		5
-9,9...-5,0	21	2	7	5
-4,9...0,0	15	15	7	11
0,1...5,0	21	31	27	10
5,1...10,0	11	10	29	36
10,1...15,0	10	21	10	22
15,1...20,0	7	10	17	7
20,1...25,0		7	3	—
25,1...30,0				2

Расчет по формуле Сивкова для территории земного шара, расположенной севернее и южнее 60-й параллели, дает более грубые оценки средних многолетних суточных сумм суммарной радиации. Так, в полярных районах СССР и Канады, а также в Антарктиде отклонения могут существенно превышать 50 %.

Расхождения между рассчитанными и измеренными значениями суточных сумм суммарной радиации для отдельных лет несколько выше по сравнению со средними многолетними, что совершенно естественно.

На рис. 2 представлено распределение по широте (с шагом 10°) максимальных отклонений (абсолютное значение) для отдельных лет.

Из результатов проведенного анализа следует, что на территории земного шара, расположенной в зоне 60° с. ш. — 60° ю. ш., для всех месяцев года отклонения не превышают 40 %. Использование формулы Сивкова за пределами указанной зоны теряет всякий смысл, так как рассчитанные значения могут отличаться от измеренных в 1,5—2 раза.

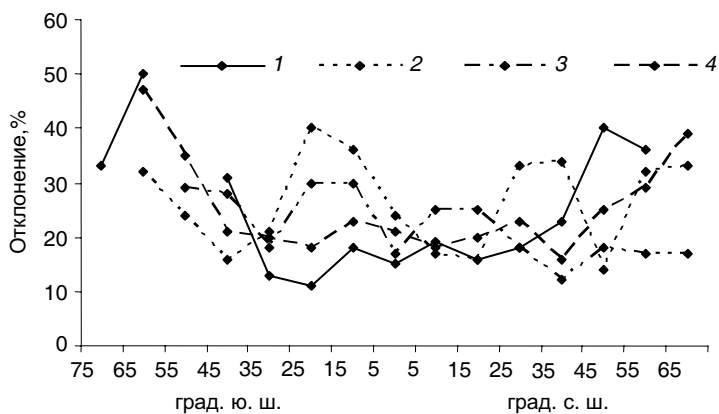


Рис. 2. Распределение по широте максимальных (абсолютное значение) отклонений средних за месяц суточных сумм суммарной солнечной радиации, рассчитанных по формуле Сивкова, от измеренных.

1 — январь, 2 — апрель, 3 — июль, 4 — октябрь.

В табл. 3 для центральных месяцев всех сезонов года и широтной зоны 60° с. ш. — 60° ю. ш. приведена повторяемость отклонений рассчитанных значений средних суточных сумм суммарной солнечной радиации от измеренных для отдельных лет. Из таблицы видно, что в 95—99 % случаев отклонение не превышает 25 %, в 90—93 % случаев — 20 % и в 80—85 % случаев — 15 %. Аномально большие отклонения объясняются либо нарушением однородности, либо тем, что продолжительность солнечного сияния регистрируется не на радиометрической станции, а на станции, расположенной рядом с ней.

Характерно, что в широтной зоне 40° с. ш. — 40° ю. ш. расчет по формуле дает в подавляющем числе случаев завышенные значения суммарной радиации по сравнению с измеренными в течение всего года. В широтной зоне 40—60° Северного и Южного полушария знак отклонения зависит от времени года. В январе расчеты дают, как правило, заниженные значения, в июле — завышенные.

Таблица 3

Повторяемость (%) отклонений рассчитанных значений средних суточных сумм суммарной солнечной радиации от измеренных для отдельных лет

Отклонение, %	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
-29,9...-25,0	1			
-24,9...-20,0	2	2		
-19,9...-15,0	3	0	1	
-14,9...-10,0	9	1	3	3
-9,9...-5,0	18	5	5	6
-4,9...0,0	16	16	14	10
0,1...5,0	18	27	23	19
5,1...10,0	13	23	20	25
10,1...15,0	7	13	18	19
15,1...20,0	8	8	9	11
20,1...25,0	2	3	3	6
25,1...30,0	2	1	3	1
30,1...35,0	1	1	1	

Выводы

1. Использование формулы Сивкова целесообразно только для территории земного шара, ограниченной параллелями 60° с. ш. и 60° ю. ш.

2. Формулу можно использовать только для расчета средних многолетних суточных значений суммарной солнечной радиации.

3. Расчет значений за отдельные годы также возможен, но лишь с использованием не конкретно рассчитанных значений (см. п. 5).

4. Отклонения средних за месяц суточных сумм суммарной солнечной радиации, рассчитанных по формуле Сивкова, от измеренных для указанной территории в большинстве случаев не превышают:

15 % для средних многолетних значений,

25 % для отдельных лет.

5. Формула Сивкова может быть рекомендована применительно к указанной территории земного шара для использования в следующих целях:

в процедурах контроля данных по суммарной солнечной радиации (Морозова, Мясников, 1993) и продолжительности солнечного сияния (средние месячные суммы),

при анализе однородности рядов по суммарной солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барашкова Е. П., Гаевский В. Л., Дьяченко Л. Н., Лугина К. М., Пивоварова З. И. (1961). Радиационный режим территории СССР. — Л.: Гидрометеиздат. — 528 с.

Гирдюк Г. В. (1965). Распределение суммарной солнечной радиации на территории Кольского полуострова. — Труды ГГО, вып. 179, с. 79—83.

Морозова И. В., Мясников Г. Н. (1993). Методические основы и программная реализация автоматизированного контроля информации о суммарной солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния, поступающей в Мировой центр радиационных данных. — Метеорология и гидрология, № 9, с. 105—111.

Сивков С. И., Лебедева К. Д. (1961). Руководство по регистрации радиации. — Л.: Гидрометеиздат. — 119 с.

Сивков С. И. (1968). Методы расчета характеристик солнечной радиации. — Л.: Гидрометеиздат. — 232 с.

Украинцев В. Н. (1939). Приближенное вычисление сумм прямой радиации и рассеянной солнечной радиации. — Метеорология и гидрология, № 6, с. 3—18.

УДК 551.510

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА В ГОРОДАХ**

Э. Ю. Безуглая, И. А. Воробьева, М. В. Полуэктова

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

Поступила в редакцию 1.12.2009

Введение

Многие годы уровни загрязнения атмосферы от антропогенных источников рассчитывались по информации о выбросах вредных веществ и метеорологических условиях, определяющих рассеяние выбросов. В свою очередь, получаемые с сети данные наблюдений за концентрацией примесей в атмосфере интерпретировались на основе информации о выбросах и метеорологических процессах. Однако в последнее десятилетие возникли проблемы с объяснением результатов измерений. Так, при росте автотранспортных выбросов стало затруднительно объяснять причины постоянства, а иногда снижения концентраций диоксида азота и оксида углерода. Еще сложнее оказалось понять фиксируемое по данным наблюдений увеличение числа городов, в которых средняя концентрация формальдегида превышает ПДК. Для выявления причин указанных изменений концентрации примесей наряду со сведениями о происходящих метеорологических процессах необходимо учитывать химические реакции в атмосфере городов.

Реакции, протекающие в воздушном бассейне, изучены в специальных камерах и подробно описаны в монографиях по химии атмосферы. Однако сложная цепь взаимосвязей и последовательностей реакций, протекающих в реальных условиях, требует нашего внимания при изучении загрязнения атмосферы.

Обнаруженный в последнее десятилетие по изменениям коэффициента трансформации оксида азота в диоксид азота рост интенсивности окислительно-восстановительных процессов в атмосфере (назовем это явление усилением химической активности атмосферы) указывает на необходимость продолжения исследований по химии атмосферы с привлечением для этого данных регулярных наблюдений за концентрациями озона, оксидов азота и многих соединений, поступающих от антропогенных источников.

Данная работа является продолжением исследований, результаты которых опубликованы в работах Э. Ю. Безуглой и др. (2008, 2009).

Зависимость коэффициента трансформации от концентрации оксида азота

В монографии Seinfeld, Pandis (1997) по химии атмосферы озон (O_3) рассматривается как главный компонент при реакциях с оксидами азота, которые играют важную роль в формировании уровня загрязнения атмосферы. Поэтому рассмотрим основные реакции, описывающие образование озона в результате фотолиза NO_2 в нижней тропосфере под воздействием оптического электромагнитного излучения с длиной волны менее 424 нм:



Здесь M представляет некую молекулу.

Как известно, озон реагирует с оксидом азота, что приводит к образованию диоксида азота:



С другой стороны, сами оксиды азота связаны между собой посредством коэффициента трансформации (КТ) оксида азота в диоксид азота:

$$KT = [NO_2]/[NO_x], \quad (4)$$

где $[NO_x] = [NO_2] + [NO]$.

Методика расчета KT изложена в работе Безуглой, Смирновой (2008). Характеристика его как показателя химической активности атмосферы дана в работе Безуглой и др. (2009).

Рассмотрим связь между концентрацией оксида азота и величиной KT . Для этого были выполнены модельные расчеты значений KT при заданных концентрациях NO_2 и NO , соответствующих реально наблюдаемым концентрациям этих веществ в атмосфере городов.

Значения KT рассчитывались при концентрациях диоксида азота от 10 до 100 млрд⁻¹, а оксида азота до 200 млрд⁻¹. На рис. 1 представлена логарифмическая зависимость KT от концентрации NO , которая может быть описана уравнением

$$KT = -0,2 \ln[NO] + 1,2. \quad (5)$$

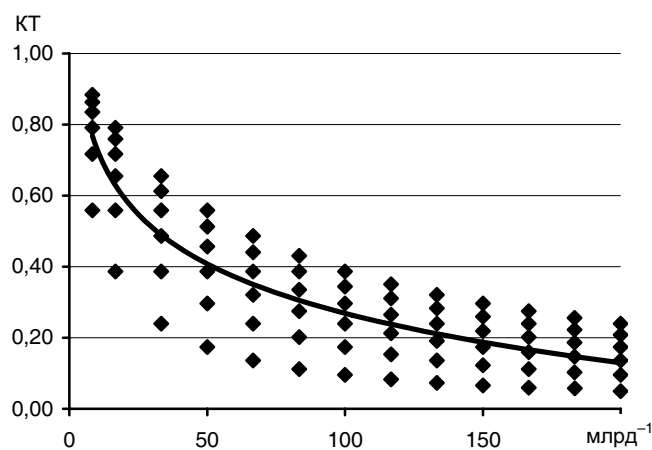


Рис. 1. Зависимость KT от концентрации оксида азота (млрд⁻¹).

Коэффициент корреляции равен 0,85. Разброс значений КТ определяется концентрацией NO_2 . Как следует из рисунка, при концентрации NO , равной 10 млрд^{-1} , КТ приближается к максимуму, соответствующему 0,7—0,8. При росте концентрации NO он уменьшается, а при концентрации NO более 200 млрд^{-1} сохраняется в пределах 0,1—0,2.

Результаты модельных расчетов были проверены по данным разовых наблюдений за 2008—2009 гг. в Санкт-Петербурге на станции, расположенной на ул. Карбышева вблизи автомагистрали, и по данным наблюдений в Архангельске в разных точках города в течение четырех месяцев.

Характер зависимости КТ от концентрации оксида азота, полученный в расчетах, подтверждается результатами измерений в Архангельске (рис. 2) при рассмотрении данных измерений в одной точке:

$$\text{КТ} = 0,10 \ln[\text{NO}] + 0,73, \quad (6)$$

и в восьми точках:

$$\text{КТ} = 0,10 \ln[\text{NO}]. \quad (7)$$

Коэффициент корреляции КТ и концентрации NO составил в Архангельске 0,8 и 0,84 для одной точки и 0,77 для восьми точек. В расчетах он составил 0,87.

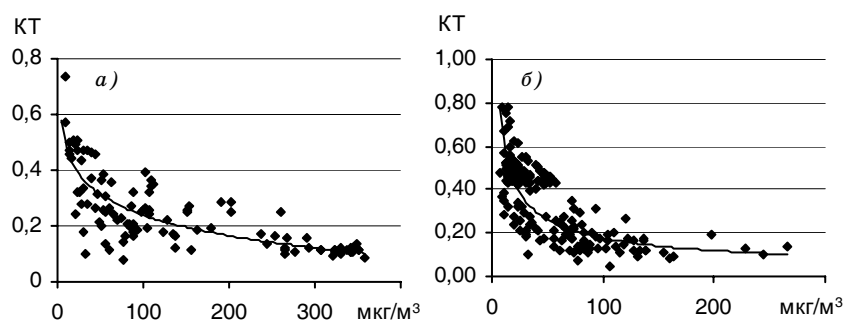


Рис. 2. Связь КТ с концентрацией оксида азота ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в Архангельске в одной точке в марте, апреле и августе (а) и в восьми точках в марте (б).

При использовании результатов измерений в восьми точках в Архангельске при концентрации оксида азота выше 200 млрд^{-1} КТ оставался в пределах $0,1\text{—}0,2$, как и в модельных расчетах, поскольку при таких высоких концентрациях реакция перехода NO в NO_2 практически прекращалась. Такие же изменения наблюдались при использовании данных измерений в одной точке в течение четырех месяцев.

В Санкт-Петербурге в течение всего года концентрация NO не превышала 400 млрд^{-1} , а значения КТ составляли $0,2\text{—}0,8$. Связь между указанными параметрами по данным измерений была также логарифмической и очень тесной. Коэффициенты корреляции изменялись от $0,76$ в августе до $0,94$ в другие месяцы 2008 г. В среднем за период с февраля 2008 г. по январь 2009 г. коэффициент корреляции составил $0,84$. На рис. 3 в качестве примера показана связь между КТ и концентрацией оксида азота в Санкт-Петербурге в сентябре.

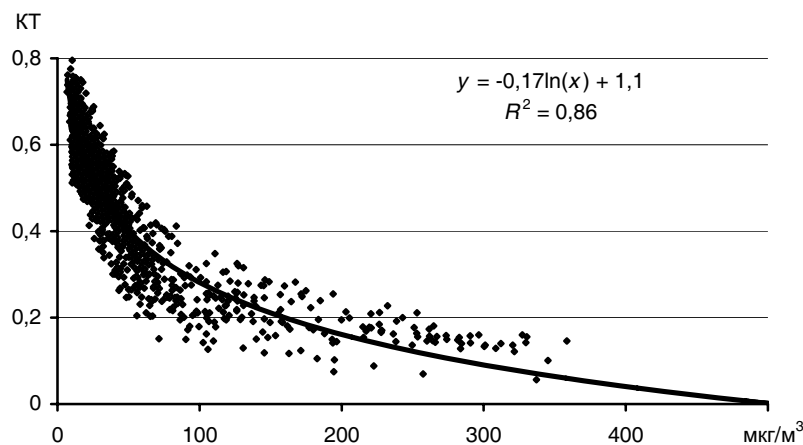


Рис. 3. Связь КТ с концентрацией оксида азота ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в Санкт-Петербурге.

В Санкт-Петербурге отмечена более тесная связь КТ и концентрации NO, обусловленная, вероятно, постоянными изменениями концентрации оксида азота, создаваемой выхлопными газами автомобилей (станция расположена в 50 м от автомагистрали с интенсивным движением автомобилей рядом с парком, отделяющим этот участок от влияния других источников загрязнения).

Для других городов при использовании средних за месяц значений концентрации NO связь значений КТ с концентрацией оксида азота оказались немного слабее, чем при использовании разовых концентраций. Коэффициенты корреляции изменялись в пределах от 0,52 в Иркутске до 0,80 в Кемерово, Новосибирске, Хабаровске и Челябинске (табл. 1). В каждом городе встречались значения концентрации NO больше 200 млрд⁻¹, при которых КТ был меньше 0,2. Не наблюдались значения КТ выше 0,8 при значениях [NO] выше 10 млрд⁻¹.

Для 19 городов по данным за 1997 и 2006 гг. связь между КТ и концентрацией оксида азота составила 0,5, что вполне объяснимо, поскольку в расчет включены данные различных городов.

Можно заключить, что тесная связь между КТ и концентрацией NO максимальна при использовании результатов разовых измерений концентрации оксидов азота и снижается при использовании данных с большим периодом осреднения. Влияние концентрации оксида азота на величину КТ может быть основополагающим.

Таблица 1

Значения коэффициента корреляции (КК) между значениями КТ и концентрацией NO

Город	Период измерений	КК	Город	Период измерений	КК
Иркутск	2002—2006	0,52	Новосибирск	2004—2007	0,8
Кемерово	2002—2006	0,83	Саратов	2004—2007	0,65
Мирный	2002—2006	0,62	Хабаровск	2003—2006	0,8
Нерюнгри	2002—2006	0,62	Челябинск	2000—2007	0,8
Новороссийск	2003—2007	0,65	(две станции)		

Благодаря взаимосвязи концентрации оксидов азота и КТ можно объяснить, казалось бы, такое необъяснимое явление, как отсутствие роста концентрации диоксида азота при постоянном увеличении числа автомобилей на дорогах городов России. Рост выбросов оксида азота приводит к уменьшению степени его трансформации и снижению или сохранению уровня концентрации диоксида азота. Поэтому при планировании снижения выбросов оксида азота необходим расчет оптимальных соотношений образующихся концентраций примесей.

Определение диапазона изменения концентраций озона в городах

Вернемся к уравнению (3), которое связывает концентрации оксидов азота и озона. Для проверки возможности использования этого уравнения для расчетов концентрации озона по результатам измерений концентрации NO_2 и NO были определены средние за месяц значения концентраций этих примесей за четыре года по данным двух станций (7 и 8) в Санкт-Петербурге.

Зависимость суммарной концентрации ($\text{O}_3 + \text{NO}$) от концентрации NO_2 представлена на рис. 4. Для станций 7 и 8 связь концентраций тесная, коэффициенты корреляции составляют 0,88 и 0,81 соответственно.

Далее был рассчитан из данных наблюдений параметр K , уравнивающий обе части уравнения:

$$\text{O}_3 + \text{NO} = \text{NO}_2 + K. \quad (8)$$

Как известно, концентрация O_2 в уравнении (3) определяется через концентрацию O_3 с учетом отношения молекулярных масс этих веществ; обозначим ее буквой M . Рассчитаем значение M для каждого месяца и сравним значения K и M для всех случаев расчета и для всех месяцев измерений в течение рассматриваемого периода. Как видно из рис. 5, по данным станции 7 коэффициент корреляции между K и M составил 0,66, а по данным станции 8 — 0,54. Это вполне хорошая связь, если учитывать, что использовано классическое химическое уравнение и реальные данные наблюдений.

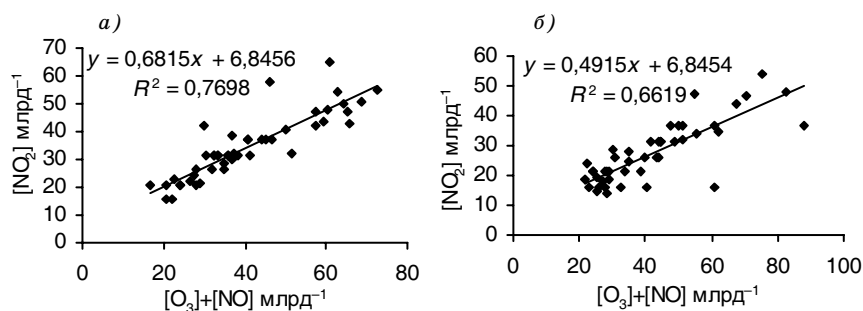


Рис. 4. Связь концентрации диоксида азота с суммарной концентрацией ($O_3 + NO$) по данным станций 7 (а) и 8 (б), Санкт-Петербург.

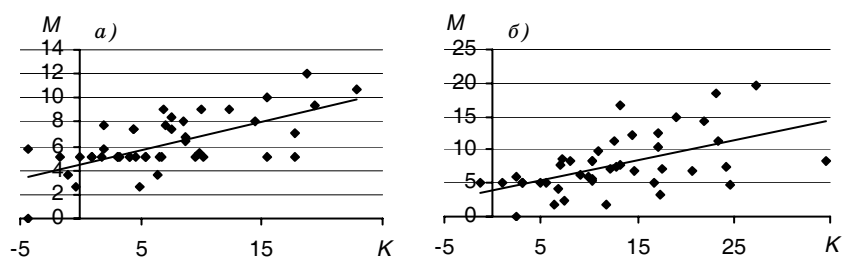


Рис. 5. Связь M и K .

а — на станции 7: $M = 0,24K + 4,52$; б — на станции 8: $M = 0,30K + 4,0$.

Заметим, что в начале работы значения концентрации озона на станции 7 в Санкт-Петербурге вызывали сомнения как слишком низкие для всего рассматриваемого периода. Однако расчеты показали, что эти концентрации соответствуют наблюдаемым значениям концентраций оксида и диоксида азота по уравнению (3).

Значения K на станциях ниже значений M . Однако свободные члены уравнения связи M и K почти одинаковы, различаются лишь коэффициенты при K , но незначительно, что может указывать на надежность полученных результатов. Напомним, что использовались разовые значения концентраций примесей, которые часто бывают случайными.

Сравнение результатов расчетов и наблюдаемых значений концентрации примеси представлено на рис. 6.

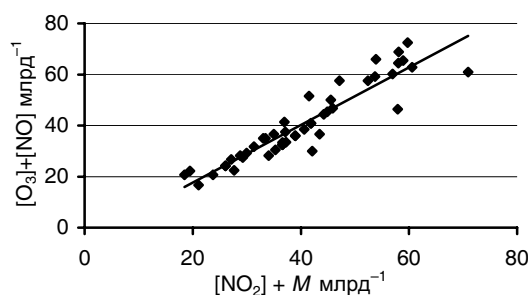


Рис. 6. Связь реальных концентраций ($O_3 + NO$) с расчетной величиной M по данным станции 7 в Санкт-Петербурге.

Таким образом, показана возможность использования выражения (8) (при замене в нем K на M) для определения диапазонов изменений концентрации озона в атмосферном воздухе городов по реальным значениям концентрации оксида и диоксида азота.

В Аналитическом обзоре (2009) показано, что наибольшие средние за месяц концентрации оксида и диоксида азота достигают 240 и 88 $\text{мкг}/\text{м}^3$ соответственно, т. е. 200 и 46 млрд^{-1} . При $[NO] = 200 \text{ млрд}^{-1}$, как показано выше, КТ не будет превышать 0,2. Следовательно, уравнение (3) не выполняется, химическая реакция почти не происходит, и озон не образуется.

Максимум концентрации озона отмечается, когда КТ = 0,7, а концентрация NO составляет 10 млрд^{-1} . В работе Безуглой и др. (2009) показано, что 95 %-ный квантиль распределения значений КТ в городах России изменяется в пределах от 0,48 до 0,65 и лишь на юге страны может достигать 0,7.

При КТ=0,7 и $[NO] = 10 \text{ млрд}^{-1}$ получаем $[NO_2] = 23 \text{ млрд}^{-1}$ и $[O_3] = 39 \text{ млрд}^{-1}$, а при КТ = 0,8 получаем $[O_3] = 60 \text{ млрд}^{-1}$, т. е. 2,6 ПДК и 4 ПДК среднесуточной. Отсюда можно заключить, что в условиях российских городов концентрация озона не может превышать 4 ПДК.

Важные особенности связи рассматриваемых газовых компонентов необходимо учитывать в работах по снижению выбросов

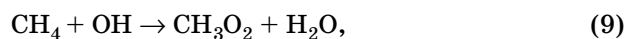
оксидов азота промышленными предприятиями. Из вышеизложенного следует, что снижение выбросов оксида азота, а следовательно, и концентраций этой примеси в атмосфере, будет сопровождаться увеличением возможностей трансформации оксида азота и повышением концентрации образовавшегося диоксида азота, а возможно, и озона. Поэтому при организации работ по снижению выбросов оксидов азота следует, прежде всего, оценить, к каким последствиям это может привести. Как было показано, оно будет сопровождаться изменениями КТ и, возможно, ростом концентрации не только диоксида азота, но и озона.

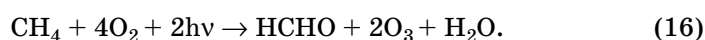
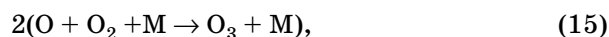
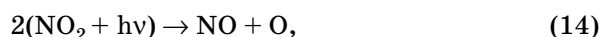
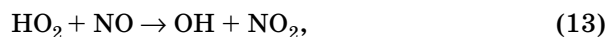
Оценка химической активности атмосферы по изменениям концентрации формальдегида

Формальдегид (НСНО), как известно, является продуктом последовательных химических реакций в атмосфере. Из Ежегодника выбросов (2008) следует, что концентрации формальдегида, обусловленные антропогенными источниками, невелики и не могут объяснить происходящее в последнее время непрерывное увеличение числа городов, в которых средние концентрации формальдегида превышают ПДК.

Формальдегид как важный компонент тропосферной химии отражает всю последовательность реакций, приведенных ниже, поскольку образование CO_2 , NO_2 и НСНО происходит одновременно.

Концентрация формальдегида возрастает летом при повышении температуры воздуха и усилении воздействия солнечной радиации, что может активизировать реакции, способствующие образованию формальдегида в атмосферном воздухе. В соответствии с работой Seinfeld, Pandis (1997) запишем цепочку реакций, заканчивающуюся образованием формальдегида:





В атмосфере, как в огромном реакторе, непрерывно происходят реакции, заканчивающиеся образованием формальдегида, для чего необходимы наличие метана и присутствие катализаторов, поэтому его высокие концентрации следует ожидать в местах, где существуют источники метана. Это важный фактор, который следует учитывать при интерпретации многолетних изменений концентрации формальдегида.

Теоретически максимум концентрации озона, который может быть образован, зависит от концентрации формальдегида и диоксида азота, но и они зависят от концентрации озона в атмосфере (Seinfeld, Pandis (1997)):

$$[\text{O}_3] = [\text{HCHO}] + [\text{NO}_2]. \quad (17)$$

Проверим, выполняется ли это уравнение в реальной атмосфере. Для этого воспользуемся данными регулярных наблюдений в городах. Возможный максимум концентрации озона, как показано выше, создается при $\text{KT} = 0,7$, $[\text{NO}] = 10$ млрд⁻¹ и $[\text{NO}_2] = 23$ млрд⁻¹ (или $[\text{NO}] = 15$ млрд⁻¹ и $[\text{NO}_2] = 35$ млрд⁻¹). Значение максимума концентрации озона при этом будет равно 39—60 млрд⁻¹. Концентрация формальдегида в этом случае в соответствии с формулой (17) составит 16—25 млрд⁻¹ (21—32 мкг/м³). Такие значения концентрации формальдегида (7—11 ПДК) зафиксированы в Братске, Белоярском, Нерюнгри, Саратове (Ежегодник, 2009).

Из выражения (17) следует, что рост концентрации диоксида азота может сопровождаться снижением концентрации формальдегида, и, наоборот, т. е. можно предсказать изменения концентрации формальдегида по данным о концентрации диоксида азота.

В работе Безуглой и др. (2008) по данным измерений концентрации оксидов азота и расчетов на их основе коэффициента трансформации показан рост химической активности атмосферы в последнее десятилетие в различных частях территории России. Увеличение степени трансформации составило 10—60 % исходных значений КТ. В данной работе предпринята попытка проследить изменения химической активности атмосферы по средним концентрациям формальдегида, полученным за тот же период (1998—2007 гг.).

Для анализа тенденции изменения концентрации формальдегида использованы результаты наблюдений на одних и тех же станциях в течение десяти лет при условии высоких его концентраций, чтобы можно было достоверно оценить многолетние изменения. При анализе исключались данные наблюдений в городах, где наблюдались резкие колебания уровня формальдегида, которые могли бы указывать на нестабильность измерений.

Анализ показал, что в расположенных поблизости друг от друга городах отмечаются сходные черты многолетних изменений концентрации формальдегида, что хорошо видно, например, из рис. 7. Во всех трех городах Архангельской области максимум концентрации отмечен в 2005 г., а минимум — в 2003 г. Синхронность изменений концентрации примеси замечена в городах Урала и соседних областях. Для изучения тенденции выбрано 109 городов, которые были подразделены на группы.

В каждую группу включались данные наблюдений в трех—шести близлежащих городах, и по ним рассчитывались средние значения для групп. Из рис. 8 видно, что сходные изменения концентрации формальдегида обнаруживаются во многих группах. Почти везде максимум концентрации формальдегида наблюдался в 2005—2006 гг.

Четко проявляется максимум концентрации формальдегида в 2005 г. — везде, кроме городов Архангельской области, по берегам реки Волги, в Красноярском крае, на Урале и в Предуралье. В некоторых городах этот максимум почти не заметен, происходит непрерывный рост концентрации формальдегида в течение всего рассматриваемого периода.

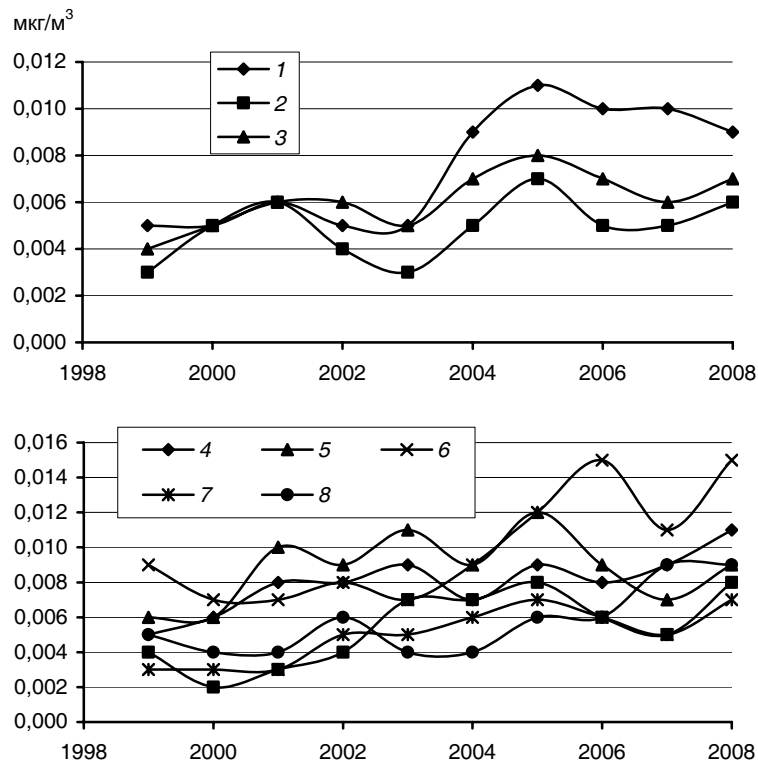


Рис. 7. Изменения концентрации формальдегида в разных городах.
 1 — Северодвинск, 2 — Архангельск, 3 — Новодвинск, 4 — Челябинск, 5 —
 Краснотурьинск, 6 — Нижний Тагил, 7 — Оренбург, 8 — Златоуст.

Выделены четыре группы городов: на побережье Азовского и Черного морей (южные области), вблизи озера Байкал, на юге Сибири, вблизи Онежского озера и Санкт-Петербург, где происходит снижение концентрации этого вещества (рис. 9).

В 66 из 109 городов отмечен рост средних концентраций примеси, который в среднем составил 84 %. В 43 из 109 городов среднее снижение концентрации формальдегида составило 38 %. Таким образом, получено, что средний рост концентрации формаль-

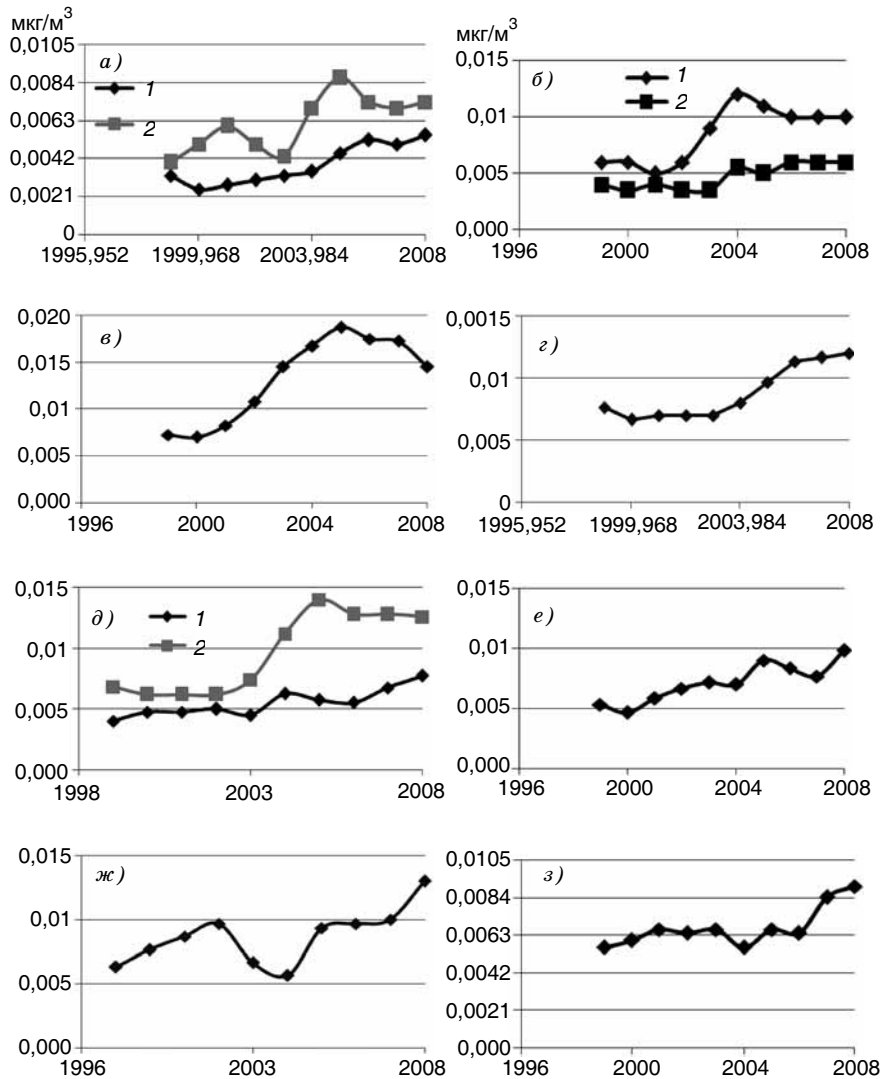


Рис. 8. Изменение средних за год концентраций формальдегида.

a — Мурманская (1) и Архангельская (2) области, *б* — Москва (1) и центральные области (2), *в* — Нижнее Поволжье, *г* — Среднее Поволжье, *д* — Красноярский край (1) и Хакасия (2), *е* — Урал, *ж* — Тульская область, *з* — Дальний восток.

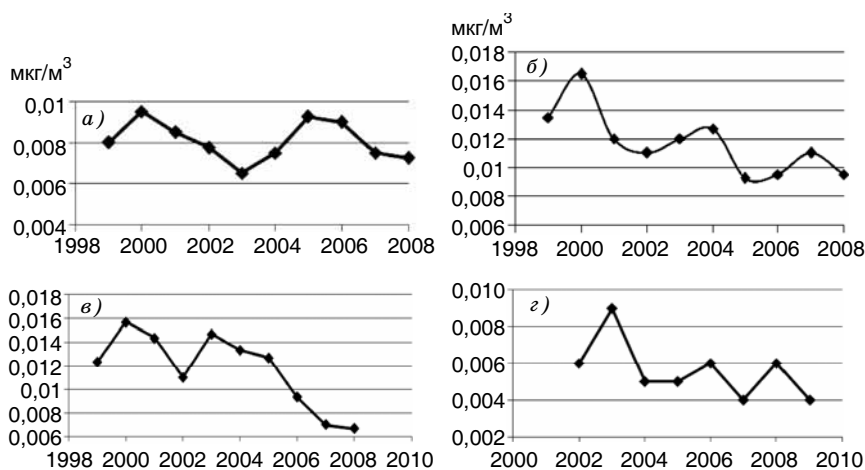


Рис. 9. Изменение средних за год концентраций формальдегида.

а — Иркутская область, б — Сибирь, в — южные области, г — Санкт-Петербург.

дегида в два раза больше, чем среднее падение. С учетом различий в числе городов, в которых происходили рост или падение, можно заключить, что преобладает тенденция роста концентрации формальдегида. Это подтверждает вывод, сделанный по данным о КТ в работе Безуглой и др. (2008), о росте химической активности атмосферы в последнее десятилетие на территории России.

Протекание реакций, в результате которых концентрация формальдегида возрастает, возможно при наличии радикалов и дополнительной энергии. Однако нам не известны пути поступления дополнительной энергии.

По данным, представленным в работе Бажина (2000), количество радикалов над континентами в пять раз больше, чем над океанами. Поэтому, возможно, химические реакции более активно протекают в континентальных районах, чем вблизи морей, где реже наблюдается рост концентрации формальдегида. Действительно, тенденция снижения отмечена, как показано выше, вблизи водных объектов. Можно лишь предполагать, что увеличение химической активности атмосферы связано с появлением новых катализаторов, способствующих протеканию этих процессов.

Для того чтобы обнаружить причину роста концентрации формальдегида, нужны измерения, отражающие постоянные изменения состава атмосферы, особенно содержания радикалов. Такие измерения не проводятся, поэтому происходящие в земной атмосфере процессы трудно поддаются объяснениям.

Количество радикалов в атмосфере и раньше было велико. Однако их становится все больше, и они вовлекают в реакции многие находящиеся в атмосфере вещества, которые ранее считались почти инертными.

О причине роста концентрации диоксида углерода

В последнее время на фоновом уровне наблюдается заметный рост концентрации диоксида углерода CO_2 . Попробуем объяснить это явление.

На северо-западе России КТ увеличился на 10—11 %. За десять лет среднее значение КТ в Санкт-Петербурге изменялось от 0,43 до 0,48, в Череповце — от 0,48 до 0,53.

В течение этого периода в городах Мурманской области произошел рост средних концентраций формальдегида (рис. 8). В Мурманске концентрация формальдегида увеличилась от 35 до 43 $\text{мкг}/\text{м}^3$, т. е. на 22,7 % (рис. 10).

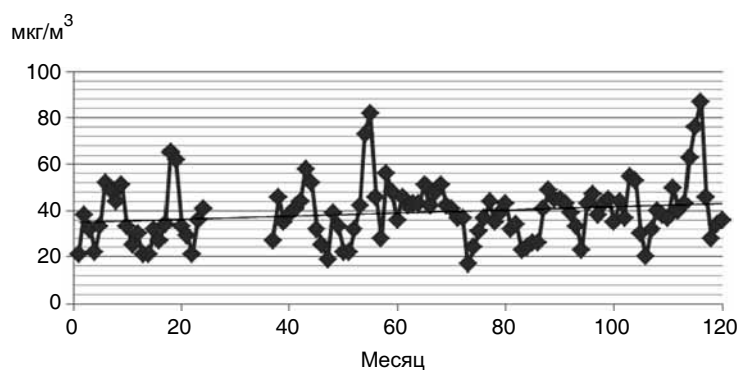


Рис. 10. Изменения среднемесячной концентрации формальдегида ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в Мурманске за десять лет.

По данным ст. Териберка, любезно предоставленным А. И. Решетниковым, за 1988—1996 гг. концентрация CO_2 увеличилась на 2 %, а с 1999 по 2007 г. рост составил 4,3 % (рис. 11).

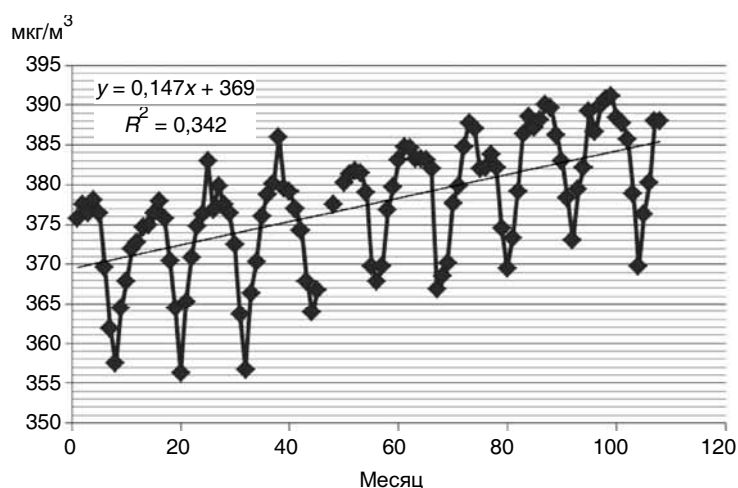


Рис. 11. Изменения среднемесячной концентрации диоксида углерода (млрд^{-1}) в Териберке.

Рост концентрации CO_2 на фоновой станции можно объяснить изменениями КТ. Значения концентрации диоксида углерода при КТ = 0,4 и росте его не на 10 %, как в городах региона, а на 4 % можно рассчитать по формуле (4).

В первый год концентрация составляла 370,8, а на десятый год по результатам расчета равна 395 млрд^{-1} , т. е. увеличилась на 6,4 %, что довольно близко к реальному изменению, равному 4,3 %.

Метан — первичная примесь, и изменения его содержания в атмосфере в результате изменения химической активности не происходит. За рассматриваемый период среднемесячные концентрации метана увеличились всего на 0,43 % (рис. 12).

На рис. 13 показана зависимость среднемесячной концентрации формальдегида в Мурманске от концентрации метана с лагом шесть месяцев. Коэффициент корреляции равен 0,57.

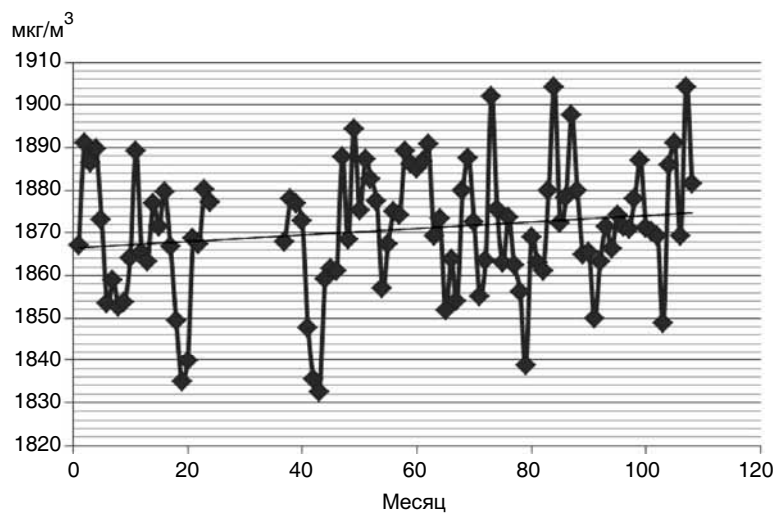


Рис. 12. Изменения среднемесячных концентраций метана (млн^{-1}) в Териберке.

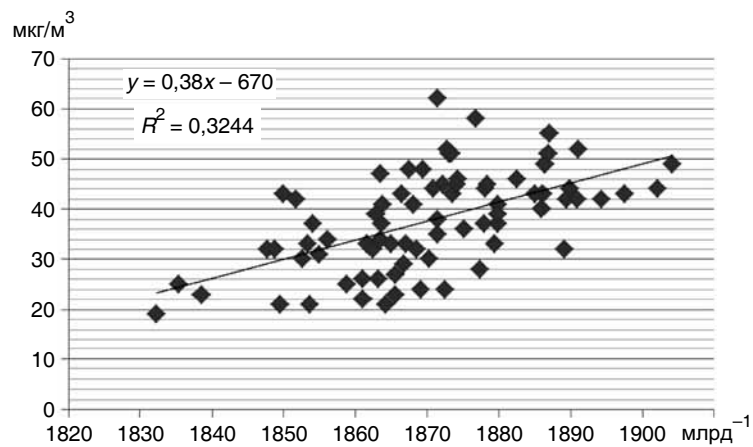


Рис. 13. Зависимость среднемесячной концентрации формальдегида ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в Мурманске от концентрации метана (млрд^{-1}) в Териберке с лагом шесть месяцев.

Надо, однако, помнить, что изменения концентрации формальдегида связаны с изменением не только концентрации метана, но и химической активности атмосферы, что снижает степень связи концентрации формальдегида с концентрацией метана.

Заключение

Использование результатов наблюдений за загрязнением атмосферы в городах России и учет основных циклов химии тропосферы, включающих реакции с озоном, формальдегидом, оксидом и диоксидом азота, позволило исследовать временные изменения этих веществ и получить ряд важных для практики выводов.

1. Проверка модельных расчетов показала наличие в реальной атмосфере тесной связи между КТ и концентрацией NO. Коэффициенты корреляции составляют для разовых концентраций 0,76—0,94, для средних за месяц значений концентрации 0,52—0,8, а для 19 городов 0,5.

2. Определен характер зависимости коэффициента трансформации от концентрации оксида азота: значения КТ в пределах 0,7—0,8 наблюдаются в основном при концентрации NO менее 20 мкг/м³. При концентрации более 200 млрд⁻¹ химические реакции замедляются и КТ составляет 0,1—0,2.

3. Использование классических химических уравнений, связывающих между собой NO, NO₂ и O₃, показало реальность их выполнения в атмосферном воздухе городов. Это дает широкие возможности для контроля данных измерений, получаемых на сети станций. Концентрация озона достигает максимума, равного 2,6 ПДК, при [NO] = 12 мкг/м³ и КТ = 0,7. При КТ = 0,8 концентрация озона могла бы достичь 4 ПДК, но в реальной атмосфере такие условия практически не наблюдаются. Это указывает на то, что озон не является приоритетной примесью в атмосфере над городами России — имеются другие вещества, концентрации которых достигают более высоких уровней ПДК.

4. Формальдегид как продукт окисления углеводородов является также существенным компонентом тропосферной химии. Использование химических уравнений позволило оценить мак-

симальную концентрацию этого вещества в городской атмосфере, которая достигается при $KT = 0,7$, $[NO]$ от 10 до 15 млрд⁻¹ и $[NO_2]$ от 23 до 35 млрд⁻¹. Максимум концентрации озона в этих условиях составит 39—60 млрд⁻¹. При таких ситуациях концентрация формальдегида составит 16—25 млрд⁻¹, или 21—32 мкг/м³, т. е. может достигнуть 7—11 ПДК. Такие значения зафиксированы в Братске, Белоярском, Нерюнгри и Саратове.

5. Результаты измерений концентрации формальдегида за 1998—2007 гг. показывают увеличение ее в 66 % городов. Средняя величина тенденции роста концентрации, составляющая 84 %, существенно больше, чем средняя величина тенденции снижения, достигающая 38 %. Это подтверждает вывод, полученный ранее по данным измерений концентрации оксидов азота и расчетов KT , о возрастании химической активности атмосферы в последнее десятилетие. Эти выводы свидетельствуют о том, что в атмосфере, вероятно, увеличилось количество радикалов, которые вовлекают в реакции вещества, например метан, считавшиеся ранее сравнительно инертными.

6. Важные особенности связи рассматриваемых газовых компонентов должны учитываться в работах по снижению выбросов оксидов азота промышленными предприятиями. Снижение выбросов оксида азота, а следовательно, и концентрации этой примеси в атмосфере, будет сопровождаться увеличением степени трансформации и увеличением количества диоксида азота, а возможно, и озона — веществ, более токсичных. Благодаря взаимосвязи оксидов азота и озона становится понятным отсутствие роста концентрации диоксида азота при постоянном увеличении числа автомобилей на дорогах городов России, поскольку рост выбросов оксида азота приводит к уменьшению степени трансформации и снижению или сохранению уровня концентрации диоксида азота, а следовательно, и озона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бажин Н. М. (2000). Метан в атмосфере. Химия.
Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. (2008). Воздух городов и его изменения. — СПб: Астерион. — 253 с.

Безуглая Э. Ю., Воробьева И. А., Ивлева Т. П., Махоткина Е. Л. (2008). Потепление как возможная причина повышения химической активности атмосферного воздуха городов. — Труды ГГО, вып. 557, с. 159—183.

Безуглая Э. Ю., Воробьева И. А., Ивлева Т. П. (2009). Химическая активность атмосферы на территории России. — Труды ГГО, вып. 559, с. 121—133.

Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2007 г. (2009). — СПб.: Астерион. — 195 с.

Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации за 2007 г. (2008). — СПб.

Аналитический обзор (2009). Качество воздуха в крупнейших городах России за десять лет. — СПб.: Астерион. — 133 с.

Seinfeld T. H., Pandis S. N. (1997). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. — Oxford: John Wiley&Sons. — 1360 p.

УДК 551.508

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ ПАРКА
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ**

В. Ю. Окоренков

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

Поступила в редакцию 1.02.2010
Поступила после доработки 24.03.2010

В настоящее время как в России, так и за рубежом разработано достаточно много автоматизированных систем контроля и управления метрологическим обслуживанием средств измерений (СИ) и систем контроля результатов измерений. Как показал анализ этих систем, они успешно решают комплексы задач по обеспечению автоматизации метрологического обслуживания СИ и ретроспективному контролю результатов их измерений. Недостаток указанных систем заключается в том, что они не позволяют осуществлять оптимальное управление процессом эксплуатации и состоянием парков СИ, без которого невозможно достижение требуемой надежности и высокого качества полученной в результате измерений информации.

В связи с этим возникает необходимость в решении специального класса многокритериальных задач оптимального управления процессом эксплуатации парков различных видов и типов СИ. Создание системы оптимального управления процессом эксплуатации и состоянием парков СИ особенно важно для метеорологических СИ (измерительных преобразователей, датчиков) и автоматизированных метеорологических информационно-измерительных систем (АМИИС), используемых для обеспечения безопасности полетов авиации.

Оптимальное управление состоянием СИ может быть реализовано только на основе прогнозирования их состояния и показателей метрологической и функциональной надежности. Следовательно, для решения указанной выше многоцелевой задачи оп-

тимального управления состоянием парка СИ необходимо проведение автоматизированного анализа, диагностики состояния и динамики изменения во времени основных метрологических параметров каждого СИ, численного моделирования и прогнозирования основных показателей эффективности процесса реального функционирования каждого СИ и в целом всего парка СИ (АМИИС) с учетом реальных ограничений и качества процесса их метрологического и технического обслуживания.

Особую сложность представляют классы задач оптимального управления в реальном масштабе времени. Учитывая, что современные АМИИС представляют собой сложные информационно-измерительные системы, включающие десятки измерительных преобразователей (датчиков) и измерительных каналов, средства обработки, отображения и передачи измерительной информации, необходимо обеспечить параллельное решение указанной выше задачи для каждого СИ (датчика), измерительного канала и в целом для всей АМИИС в реальном или «псевдореальном» времени.

Для большинства измерительных каналов АМИИС достаточно обеспечить завершение цикла решения задачи в течение одной минуты, и лишь для канала измерения скорости воздушного потока (контроля осредненной мгновенной скорости ветра) цикл решения задачи должен быть завершен в течение 15 секунд, что вполне реально при использовании мощных персональных компьютеров.

В Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова еще в 1980—1993 гг. был выполнен цикл работ по исследованию надежности основных типов метеорологических СИ, на основе которых был разработан и опробован ряд специализированных систем:

Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью СИ (NUPOM);

Система моделирования функционирования парка метеорологических СИ (SIMENS-F);

Автоматизированная система управления и контроля метрологической надежности парка СИ;

Автоматизированная система управления метрологическим обеспечением метеорологических средств измерений (АСУ МО).

Создание, тестирование и внедрение в оперативную работу указанных выше систем позволили создать более сложную и универсальную автоматизированную систему анализа и управления состоянием парка метеорологических СИ — автоматизированную систему управления STATUS-SI (АСУ STATUS-SI).

АСУ STATUS-SI стала логическим развитием разработанных ранее систем.

Основные методы и алгоритмы, реализованные при разработке АСУ STATUS-SI изложены в нормативных документах по анализу состояния парков СИ и ряде работ автора (см. список литературы).

АСУ STATUS-SI предназначена для мониторинга метрологической и функциональной надежности парков СИ любых типов и видов, и в первую очередь гидрометеорологических СИ, обеспечивающих безопасность полетов авиации наземного и морского базирования, эталонных и рабочих СИ УГМС, ЦГМС Росгидромета, метрологических служб других ведомств. АСУ STATUS-SI представляет собой интегрированную диагностическую систему, которая обнаруживает и дает возможность предотвращать (за счет введения индивидуальных межповерочных, межремонтных, межпрофилактических интервалов) метрологические и явные отказы, прогнозирует остаточный ресурс и продляет срок службы эксплуатируемых СИ. В системе реализованы методы и алгоритмы анализа состояния и прогнозирования основных показателей метрологической надежности для гидрометеорологических СИ, регламентированные МИ ГСИ 2918—2005 «Анализ состояния и прогнозирование основных показателей надежности гидрометеорологических средств измерений».

АСУ реализует концепцию управления парком СИ по их фактическому и прогнозируемому состоянию, формирует оптимальные планы по оперативному управлению эксплуатацией парка СИ, его метрологическому и техническому обслуживанию.

АСУ обеспечивает требуемую надежность и безотказность каждого СИ и всего парка СИ в целом при соблюдении оптимального плана их метрологического (поверка, калибровка, контроль) и технического (регулировка, профилактика, ремонт, замена) обслуживания при минимуме затрат на полный цикл их эксплуатации (жизненный цикл).

С 1990 по 1992 г. в режиме опробования (накопления знаний и данных) для парков СИ атмосферного давления в 39 УГМС Росгидромета была внедрена первая версия АСУ (на базе СУБД типа КАРС). Вторая версия АСУ на базе ПЭВМ типа IBM/PC была введена в оперативную работу Росгидромета в 1993 г.

В режиме опробования исходная информация для функционирования АСУ накапливается и анализируется АСУ для любых видов и типов СИ в течение периода, который для простых сетевых СИ обычно длится от 6 до 12 месяцев в зависимости от оперативности поступления данных о результатах метрологического (поверка, калибровка, аттестация) и технического (ремонт, профилактика, замена) обслуживания парка СИ, межповерочных интервалов (МПИ), размеров парка СИ и телекоммуникационных возможностей для передачи и ввода данных в СУБД АСУ.

Для аэродромных АМИИС цикл накопления исходной информации для АСУ значительно короче, так как архивные данные о состоянии ее датчиков и измерительных каналов имеются с момента ввода ее в эксплуатацию.

Информационной основой АСУ служит банк данных о состоянии парков однотипных СИ (датчиков, измерительных каналов). Банк данных включает базы знаний и данных и базы результатов анализа типов и видов СИ. База знаний содержит библиотеку типовых знаний о нормативных и нормируемых метрологических характеристиках однотипных СИ, нормируемых показателях их надежности и стабильности, ограничениях на целевые функции управления состоянием парка СИ, на пропускные способности поверочных и ремонтных организаций, показатели качества поверки и ремонта (браки поверки 1-го и 2-го рода и т. п.) и базу оперативных знаний, которые автоматически модифицируются при поступлении новых данных по результатам работы АСУ.

В первой и второй версиях АСУ в качестве оперативных знаний в основном используются типовые модели дрейфа систематической и случайной составляющих основной погрешности однотипных СИ, коэффициенты которых динамически изменяются при каждом цикле работы АСУ при условии внесения в базу новых данных об изменении метрологических характеристик СИ после их ремонта, поверки или калибровки.

Основными режимами функционирования АСУ являются режимы диагностики и имитационного моделирования, которые реализуются системой на нескольких уровнях.

На первом уровне после диагностики текущего состояния СИ по динамике изменения во времени их нормируемых метрологических характеристик осуществляется моделирование дрейфа во времени начальных параметров систематической и случайной составляющих основной погрешности для каждого СИ по результатам его двух (предыдущей и последующей) или трех последних поверок (калибровок или аттестаций), а для новых СИ только по результатам первичной поверки. Для АМИИС диагностика текущего состояния производится по динамической выборке текущих результатов измерений с использованием базы знаний о метрологических и явных отказах датчиков, измерительных каналов, их отдельных элементов, причинах возникновения и проявления отказов в результатах измерений.

На втором уровне для каждого СИ для оценки параметров закона распределения наработки до метрологического отказа (времени безотказной работы) осуществляется моделирование дрейфа основной погрешности для 1000 случайных реализаций, начальные параметры которых получены на первом уровне моделирования.

На третьем уровне осуществляется моделирование процесса реального функционирования для СИ, время безотказной работы которых меньше или равно МПИ. Моделирование осуществляется для свертки укрупненных процессов изменения надежности, метрологического и технического обслуживания для 100 или более случайных реализаций, число которых задается пользователем. Вероятностные модели указанных выше процессов и математическая постановка задачи изложены в работах автора.

Для решения многопараметрической задачи анализа качества функционирования парка восстанавливаемых СИ использован метод моделирования, реализованный в комплексе программ, в том числе разработанных автором.

Существенное отличие настоящей реализации задачи от уже известной состоит в том, что моделируется нестационарная модель парка СИ. Для этого задаются нестационарные потоки ввода и вывода СИ из эксплуатации, имитирующие динамику количествен-

ного изменения во времени парка СИ, которые в рамках данной задачи задают нестационарный процесс изменения размеров моделируемого пространства состояний, что весьма важно для точного моделирования динамики формирования и обновления парка СИ. Результаты моделирования позволяют принимать решения о выборе оптимального управляющего воздействия на состояние конкретного СИ (калибровать, проверять, ремонтировать, заменять и т. п.) и времени его реализации. По результатам моделирования в целом всего парка СИ АСУ составляет графики поверки, ремонта, замены СИ и оценивает экономические затраты на их реализацию.

Весьма важной подсистемой АСУ является подсистема модификации знаний. Реализация подсистемы модификации знаний о состоянии парка СИ заключается в дополнении базы знаний результатами моделирования наработки до метрологического отказа СИ и сравнении их с фактически установленной наработкой до отказа, что позволяет АСУ автоматически производить настройку (адаптацию) подсистемы моделирования метрологических отказов на минимизацию их разности. Модели новых знаний о состоянии СИ в конкретном парке создаются АСУ по мере накопления фактических и модельных данных методом их агрегатирования, а в простейших случаях представляют собой модели изменения во времени различных нормируемых метрологических характеристик в виде полиномов различных степеней, коэффициенты которых автоматически вносятся в базу знаний.

Оперативное использование результатов моделирования парка однотипных СИ в виде индивидуальных графиков поверки, ремонта, профилактики, замены, таблиц прогнозируемой наработки до метрологического отказа, планируемых затрат на метрологическое и техническое обслуживание парка СИ не представляет принципиальных трудностей для служб средств измерений (ССИ) за исключением финансовых. В то же время, анализ данных о состоянии парков СИ в совокупности представляет собой нетривиальную задачу, так как в этом случае простейшие продукционные правила оценки состояния по отдельным параметрам неприменимы. Так, например, уменьшение доли метрологических отказов СИ может не означать увеличения надежно-

сти СИ, если при этом доля неповеренных СИ возрастает (нет проверки — нет обнаруженных отказов).

Продукционные правила в случае анализа состояния совокупности парков СИ весьма сложные, для их создания и модификации (в процессе функционирования АСУ) нужна специальная экспертная диагностическая система. В представленной системе ее функции выполняет подсистема анализа и интерпретации текущего состояния парка СИ, алгоритмы функционирования которой представлены в МИ 2819—2005. Оценка интегрального показателя состояния парка СИ и идентификация его по пяти градациям (повреждения нет, повреждение легкое, повреждение среднее, повреждение сильное, повреждение разрушительное) позволяют АСУ дать пользователям конкретные типовые рекомендации по управлению состоянием парка СИ, заключающиеся в совокупности мер, целесообразных для восстановления надежности парка СИ.

Однако для принятия решений по переоснащению парка новыми СИ в условиях существующего дефицита финансирования требуется создание не декларативных, а интерактивных экспертных систем, которые не только правильно оценивают состояние парка СИ, но и способны обеспечить принятие решений по управлению его состоянием в любых условиях, т.е. обеспечить оптимальное управление состоянием парка СИ при всех возможных вариантах действий пользователя АСУ.

Эффективность внедрения в системе Росгидромета АСУ STATUS-SI весьма высока. Так, для парка сетевых барометров за период с 1991 по 1997 г. системой было обнаружено и предотвращено 1538 метрологических отказов, что эквивалентно 63,9 % всего парка барометров, причем 22,5 % всех отказов было предотвращено в аэропортах. За указанный период для 1999 барометров АСУ были рекомендованы индивидуальные межповторные интервалы, предупреждающие возникновение отказов. Опытное внедрение системы позволило сократить долю отказов барометров в аэропортах с 10,9 до 1,1 %, что соответствует повышению метрологической надежности в 9,9 раза.

Создание и внедрение в системе Росгидромета нового поколения интеллектуальных эталонных и рабочих СИ (в том числе ба-

рометров, термометров, гигрометров, анемометров, средств измерений метеорологической дальности видимости и высоты облаков), автоматических метеорологических станций выдвигает новые требования к автоматизированным системам управления, а именно выявление и предупреждение всех видов отказов СИ, датчиков, вторичных преобразователей и в целом АМИИС на местах их эксплуатации, что решается в настоящее время в автоматизированной системе поверки (АСП), входящей в состав мобильных и стационарных автоматизированных поверочных лабораторий типа МАПЛ-1 и СПЛ-1, которые разработаны ГУ «ГГО» под руководством автора и внедрены в системе Росгидромета.

Внедрение АСУ STATUS-SI в УГМС и ЦГМС основано на новой технологии метрологического и технического обслуживания парков СИ, приведенной в монографии Окорокова (2006). Новая технология предусматривает внедрение нового поколения СПЛ-1 и МАПЛ-1 с АСП, включающими АСУ STATUS-SI.

Полная интеграция АСП (как низовой подсистемы СПЛ-1 и МАПЛ-1) с АСУ STATUS-SI (как системы верхнего уровня управления) обеспечивает ее эффективное внедрение в УГМС Росгидромета на основе 28 МАПЛ-1 и 14 СПЛ-1, которые были внедрены в УГМС Росгидромета в 2008—2009 гг., и решает целый комплекс взаимосвязанных задач оптимального управления состоянием парков СИ.

Внедрение АСУ STATUS-SI обеспечивает создание и внедрение новой технологии оптимального (по критериям метрологической надежности и минимальной стоимости) управления состоянием парков метеорологических СИ в соответствии с требованиями МИ 2918—2005, что существенно повышает уровень метрологической надежности и не менее чем в два раза сокращает затраты на метрологическое и техническое обслуживание парков СИ (за счет введения индивидуальных межповерочных, межпрофилактических и межремонтных интервалов) на всех этапах жизненного цикла нового поколения метеорологических СИ, АМИИС, измерительных комплексов и систем.

Техническое и программное обеспечение АСУ STATUS-SI (как системы верхнего уровня управления) обеспечивается вычисли-

тельной техникой, входящей в состав стационарных и мобильных автоматизированных поверочных лабораторий, а специальное программное обеспечение (СПО—АСУ) интегрировано с программным обеспечением АСП—СПЛ-1 и АСП—МАПЛ-1.

Таким образом, решение задачи оптимального управления состоянием парков метеорологических СИ получило практическое внедрение в системе Росгидромета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Окоренков В. Ю. (1982). Расчет и прогнозирование метрологической надежности средств измерений на основе метода имитационно-вероятностного моделирования процесса их эксплуатации. — Труды ГГО, вып. 465, с. 97—101.

Окоренков В. Ю. (1985а). Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений. — Труды ГГО, вып. 476, с. 40—66.

Окоренков В. Ю. (1985б). Система моделирования функционирования парка метеорологических средств измерений. — Обнинск: ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, инв. № 051050923.

Окоренков В. Ю. (1985в). Автоматизированная система управления, контроля метрологической надежности парка средств измерений. — Обнинск: ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, инв. № 0240.

Окоренков В. Ю. (1987). Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений. — Обнинск: ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, инв. № 051050923.

Окоренков В. Ю. (1989). Автоматизированная система обнаружения метрологических отказов метеорологических средств измерений. — Обнинск: ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, инв. № 41070.

Окоренков В. Ю. (2006). Методы и средства поверки метеорологических информационно-измерительных систем и средств измерений. — СПб.: Астерион. — 518 с.

МИ 2918—2005 (2006). ГСИ. Анализ состояния и прогнозирование основных показателей метрологической надежности гидрометеорологических средств измерений / Разработчик В. Ю. Окоренков. — СПб.: Астерион. — 18 с.

УДК 551.508

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В. Ю. Окоренков

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

Поступила в редакцию 1.02.2010
После доработки 24.03.2010

Введение

Аэродромные и сетевые автоматизированные метеорологические информационно-измерительные системы (АМИИС), комплексы (АМК) и станции (АМС) имеют непрерывный режим эксплуатации во всем спектре климатических условий. Учитывая, что аппаратные средства (за исключением системных блоков средств связи и средств отображения), датчики АМИИС и АМС (АМК) эксплуатируются в естественных условиях, влияние климатических условий на их метрологическую надежность весьма значительно.

Метрологическая надежность АМИИС, АМК, АМС и СИ зависит от их стабильности и установленных нормативов: пределов допускаемых значений основной погрешности, нормируемых метрологических характеристик (НМХ), погрешности градуировки, межповерочного интервала, а также от условий эксплуатации СИ и т. п. Поэтому оценка метрологической надежности АМИИС, АМК, АМС и СИ возможна только на основе исследования их стабильности во времени.

Нестационарный характер воздействия климатических условий на датчики и аппаратные средства АМИИС, АМС, АМК вызывает (наряду с постепенными метрологическими отказами) особый вид метрологических отказов (исчезающих после окончания воздействия) — сбой (перемеживающийся метрологический отказ), который очень трудно обнаружить и устранить при пер-

вичной и периодической поверке. Классификация метрологических отказов метеорологических СИ приведена в одной из работ автора (Окоренков, 1990).

Непрерывный режим эксплуатации АМИИС, АМК, АМС определяет специфические требования к обеспечению их надежности: все виды метрологических отказов должны быть обнаружены и устранены в кратчайшие сроки непосредственно на месте их эксплуатации без потерь качества метеорологической информации, необходимой в том числе для обеспечения взлета или посадки воздушных судов.

Для обеспечения высокой метрологической надежности АМИИС, АМК, АМС в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) разработаны и внедрены в системе Росгидромета мобильные автоматизированные лаборатории (МАПЛ-1), которые оснащены портативными поверочными комплексами КПП-1 — КПП-6. МАПЛ-1 реализуют наиболее эффективный комплексный метод поверки АМИИС, АМК, АМС на местах их эксплуатации.

Теоретические основы и методология прогнозирования метрологической надежности метеорологических СИ и АМИИС изложены в ряде работ автора (Окоренков, 1982—1990), а также в рекомендациях РМГ 74—2004, МИ 2918—2005 и реализованы на основе следующих автоматизированных систем, разработанных в ГГО:

Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений (NUPOM);

Система моделирования функционирования парка метеорологических средств измерений (SIMENS-F);

Автоматизированная система управления, контроля метрологической надежности парка средств измерений (АСУ МО);

Автоматизированная система обнаружения метрологических отказов метеорологических средств измерений (SOS);

Автоматизированная система анализа и управления состоянием парков гидрометеорологических и океанологических средств измерений (STATUS-SI).

Оценки показателей метрологической надежности датчиков и в целом АМИИС, АМК, АМС, представленные в настоящей работе, получены на основе статистических данных, собранных при их периодической поверке, ремонте, в том числе с использованием МАПЛ-1, КПП-1 — КПП-6, что регламентировано МИ 2713—2008.

Методика исследований (испытаний) на метрологическую надежность основных типов метеорологических датчиков АМИИС на этапе их эксплуатации предусматривала формирование партии однотипных метеорологических датчиков, входящих в состав АМИИС (объем партии не менее 66 экземпляров — весь парк АМИИС), которые находятся в эксплуатации и поверяются через каждые 12 мес в соответствии с МИ 2713—2008.

При оценке математического ожидания и среднего квадратического отклонения (СКО) наработки до метрологического отказа, т. е. при оценке времени безотказной работы и дрейфа систематической и случайной составляющих основной погрешности метеорологических датчиков, период исследований составлял три года (2008—2010 гг.). По результатам проверок однотипных метеорологических датчиков за каждый межповерочный интервал (МПИ), равный 12 мес, находились значения нестабильности их систематической и случайной составляющих основной погрешности:

средняя нестабильность за период $\Delta t = t_{\text{МПИ}}$

$$\bar{m}(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \xi_j(i\Delta t), \quad i = 1, \dots, n; \quad (1)$$

СКО нестабильности за период $\Delta t = t_{\text{МПИ}}$

$$\sigma(i\Delta t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [\xi_j(i\Delta t) - \bar{m}(i\Delta t)]^2}. \quad (2)$$

По значениям, полученным по формулам (1) и (2), оценивались функции зависимости от времени средней нестабильности $m(t)$ и СКО нестабильности $\sigma(t)$ систематической составляющей основной погрешности в виде

$$m(t) = \sum_{k=0}^1 m_k t^k, \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{rt}. \quad (4)$$

Коэффициенты m_k , σ_0 , r подбираются методом наименьших квадратов для функций $m(t)$ и $\sigma(t)$. Порядок полинома выбирают из ряда 1, ..., 5 по критерию минимума погрешности аппроксимации.

Кроме этого, для получения более репрезентативных функций неустойчивости метеорологических датчиков, входящих в состав АМИИС, АМК, АМС, были использованы результаты их исследований за период с 1989 по 2007 г., представленные в ряде работ автора (Окоренков, 1989, 1990, 2007), а также статистические оценки наработки до метрологического отказа метеорологических СИ и датчиков АМИИС, представленные в работе автора (Окоренков, 1990), которая обобщает цикл работ по исследованиям метрологической надежности, проведенным в ГУ «ГГО» за период с 1980 по 1990 г.

Для нового поколения метеосистем типа МКС (МКС-М1, МКС-М2, МКС-М3), внедряемых в настоящее время на наземной наблюдательной сети Росгидромета, в ГГО проводятся экспериментальные исследования метрологической надежности датчиков давления, температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, осадков.

Для практического применения методологии прогнозирования метрологической надежности метеорологических АМИИС, АМС, АМК и СИ требуются современные методы и средства поверки (определение НМХ в соответствии с методиками поверки, например комплексной методикой поверки МИ 2713—2008 для АМИИС, АМС, АМК), а также автоматизированные системы поверки (например, АСП АМИИС, входящая в состав МАПЛ-1) со встроенными подсистемами прогнозирования метрологической надежности, которые представлены в монографии Окоренкова (2006) и рекомендациях РМГ 74—2004.

Для современных АМИИС, АМС, АМК большое значение имеет надежность не только аппаратных средств и датчиков, но и их базового и специального программного обеспечения (СПО). Теоретические вопросы надежности аппаратно-программных комплексов подробно изложены в работе Черкесова (2005). В настоящее время в ГГО работы по оценке надежности СПО АМИИС активно проводятся для АМИИС-2000, АМИС-РФ, КРАМС-4, АМИС-1, АМС-2000 и др. Для исследования надежности СПО разрабатываются методики и программное обеспечение (СПО-тестирование АМИИС).

Методология анализа и оценки основных показателей надежности АМИИС, АМС, АМК аналогична представленной ранее в работах автора (Окоренков, 2005, 2007) и поэтому в настоящей работе не приводится.

При этом оценивались не только основные показатели метрологической надежности основных типов АМИИС в целом, а также датчиков, входящих в их состав, но и соответствие их состава и технических характеристик требованиям как отечественных (НМО-ГА-95, НГЭА-92), так и международных (Технический регламент ВМО, Приложение 3 ИКАО) регламентирующих документов.

Состояние парка АМИИС и их датчиков определялось с учетом сроков эксплуатации, числа и типов отказов, а также оценок их надежности и работоспособности на местах в соответствии с «Правилами эксплуатации метеорологического оборудования аэродромов гражданской авиации» ПЭМОА-86 с учетом показателей надежности (наработки до отказа, ресурса) и наличия удостоверений годности по всем основным измеряемым метеорологическим параметрам: метеорологической дальности видимости (МДВ), высоты нижней границы облаков (ВНГО), скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления.

1. Анализ состояния аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем

Результаты анализа состояния парка АМИИС показали, что на 1 января 2009 г. в аэропортах эксплуатируется 66 аэродромных автоматизированных метеосистем: КРАМС-4 — 29 шт.,

АМИС-РФ — 30 шт., АМИИС-2000 — 2 шт., АМИС-1 — 1 шт. и КРАМС-2 — 4 шт. (рис. 1). Наиболее старыми (с точки зрения разработки) являются системы КРАМС-2, а наиболее новыми — системы АМИИС-2000 и АМИС-1. Около 22 % аэродромов гражданской авиации оборудованы АМИИС, обеспечивающими автоматическое дистанционное измерение метеорологических параметров, необходимых для обеспечения взлета и посадки воздушных судов, обработку результатов измерений, автоматическое формирование сводок погоды и передачу их на средства отображения и в линии связи с непрерывной регистрацией всей необходимой информации.

Из 66 АМИИС для шести АМИИС (9,4 % — КРАМС-4, АМИС-РФ, КРАМС-2) срок эксплуатации превысил установленный производителем ресурс (10 лет), а для восьми АМИИС (12,5 % — КРАМС-4, АМИС-РФ) достиг этого предельного значения, что позволяет сделать вывод о том, что 14 АМИИС (21,9 %) выработало свой ресурс и, вероятно, требует замены.

Для решения вопроса о замене систем, выработавших ресурс, необходимо проведение мониторинга их состояния и комплексное исследование метрологической надежности, для чего целесообразно использовать мобильные автоматизированные поверочные лаборатории типа МАПЛ-1. Из всех АМИИС одна система не имеет удостоверения годности (АМИС-РФ), пять систем (четыре КРАМС-2 и одна АМИС-РФ) имеют просроченные удостоверение годности, а для десяти систем (восемь КРАМС-4 и две АМИС-РФ) срок удостоверения годности закончился в 2009 г.

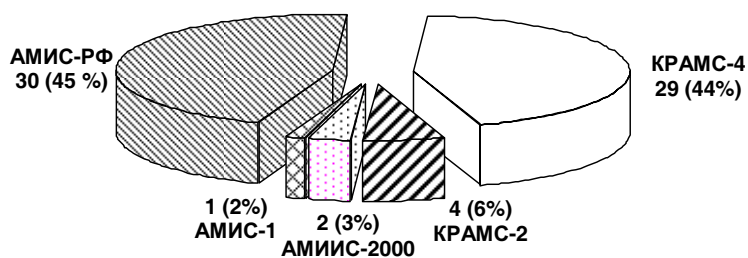


Рис. 1. Доля метеосистем разных типов, эксплуатируемых в аэропортах.

Для АМИИС, срок действия удостоверений годности которых истек, желательно проведение не только мониторинга их состояния, но также комплексного исследования метрологической надежности. Учитывая, что АМИИС, находящиеся в настоящее время в эксплуатации, имеют различные версии специального программного обеспечения, часть из которых технически устарела (например, для АМИИС, эксплуатирующихся более 10 лет), целесообразно провести его тестирование и замену на более современные версии. Для повышения надежности СПО АМИИС целесообразно разработать единые требования к алгоритмам измерений и программному обеспечению, а также разработать и внедрить в практику системы для его тестирования.

2. Метрологическая надежность аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем

Как было сказано выше, метрологическая надежность АМИИС зависит от многих факторов, и в первую очередь от надежности метеорологических датчиков, входящих в их состав. В данной работе приведена оценка метрологической надежности АМИИС по основному критерию — средней наработке до метрологического отказа (T_{cp}).

Средняя наработка до отказа — это, согласно ГОСТ 27-002-89, математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. В нашем случае средняя наработка до метрологического отказа АМИИС — это отношение суммарной наработки до отказа всех метеорологических датчиков, входящих в состав АМИИС, к их числу. Влияние функциональных (явных) отказов центральной системы (компьютеров, средств коммуникации, источников бесперебойного питания, фильтров, индикаторных устройств и т. п.), сбоев базового и специального программного обеспечения на среднюю наработку до метрологического отказа не учитывалось, хотя в целом ряде случаев может вызывать инициированные метрологические отказы типа сбоя.

Анализ проведенных исследований показал, что наиболее высокие показатели надежности имеют метеосистемы, укомплекто-

ванные метеорологическими датчиками производства фирмы «Вайсала». Средняя наработка до метрологического отказа ($T_{\text{ср}}$) АМИИС типа КРАМС-4 и АМИС-РФ, оборудованных датчиками фирмы «Вайсала», составляет от 23,2 до 30,4 мес в зависимости от комплектации. Существенно снижаются показатели надежности указанных аэродромных систем ($T_{\text{ср}} = 23,19$ мес) при включении в их состав отечественных датчиков ВНГО типа ДВО-2, которые имеют среднюю наработку до отказа не более 22,3 мес.

Близкие к указанным выше показателям надежности ($T_{\text{ср}}$ от 22,4 до 24,3 мес) имеют системы типа АМИИС-2000, которые комплектуются отечественными датчиками: метеорологической дальности видимости типа ФИ-3, измерителями ВНГО типа ДВО-2/ДВО-2мк (модернизированный вариант ДВО-2) или СТ25К (СЛ-31) фирмы «Вайсала», датчиками атмосферного давления типа БРС-1М-1, БРС-1М-2, измерителями скорости и направления ветра типа М127М/М127мп (модернизированный вариант датчиков М-127) и датчиком температуры/влажности воздуха типа НМР-45D фирмы «Вайсала»). Особенностью систем типа АМИИС-2000 является комплектация отечественными датчиками, имеющими более высокие показатели метрологической надежности за счет их дополнительной приработки и индивидуальной калибровки. АМИИС-2000 прошли опытную эксплуатацию в аэропорту «Пулково», и имеют положительное заключение Главного авиационного метеорологического центра (ГАМЦ) о надежности работы и успешно эксплуатируются (с 2004 г.) на космодроме «Байконур» и в аэропорту «Норильск», что позволяет рекомендовать их для внедрения в системе Росгидромета наряду с широко представленными на авиаметсети Росгидромета системами типа АМИС-РФ и КРАМС-4.

Кроме указанных выше систем, в системе Росгидромета в эксплуатации находится аэродромная система типа АМИС-1, которая включает: датчики параметров ветра типа ИПВ-01, датчик ветра типа WAA151/WAV151 (фирма «Вайсала»), измерители МДВ типа ФИ-2, измерители ВНГО типа ДВО-2, датчики атмосферного давления типа БРС-1, БРС-1М, датчик температуры воздуха типа ТСП-002 и датчик влажности воздуха типа

ЮКФВ.411552.001. Средняя наработка до метрологического отказа системы АМИС-1 не превышает 22,2 мес, что несколько ниже оценок T_{cp} указанных выше систем.

Наиболее низкие показатели метрологической надежности ($T_{cp} = 18,7$ мес, $\sigma = 9,3$ мес) имеют системы типа КРАМС-2, КРАМС-2-АРМ, которые комплектовались устаревшими отечественными датчиками метеорологической дальности видимости типа ФИ-1, измерителями высоты нижней границы облаков типа ДВО, измерителями скорости и направления ветра типов М-63М, М-127, блоком датчиков температуры и влажности типа БДТВ, датчиками давления КРАМС-2. Ресурс систем КРАМС-2, КРАМС-2-АРМ давно истек, и они требуют замены на более надежные.

Ниже приводятся данные (часть из которых была ранее опубликована автором) о метрологической надежности датчиков, входящих в состав АМИИС различных конфигураций.

Метрологическая надежность измерителей метеорологической дальности видимости. Инструментальными средствами измерения видимости оборудовано около трети аэродромов, и в частности все категорированные аэродромы, около 60 % некатегорированных аэродромов классов А, Б, В, а также 15 % аэродромов класса Г, что обеспечивает выполнение действующих требований НГЭА-92. Резервные комплекты измерителей видимости используются на всех аэродромах, обеспечивающих посадку по минимуму II и III категории, и на 80 % аэродромов I категории.

Более 30 % аэродромов, оборудованных инструментальными средствами измерения видимости, оснащены трансмиссометрами (базисными фотометрами) старого образца типа РДВ-3, вероятность ($P_{вбр}$) безотказной работы которых составляет 0,81, и фотометрами типа ФИ-1 ($P_{вбр} = 0,81$), имеющими многочисленные отказы, продленный ресурс и требующими замены на более совершенное оборудование. РДВ-3 и ФИ-1 установлены в основном на некатегорированных аэродромах.

На аэродромах гражданской авиации (ГА) в последнее десятилетие в основном используются измерители видимости фирмы ООО «ЛОМО-МЕТЕО» типа ФИ-2 и ФИ-3, получившие в целом положительные отзывы на сети АМСГ. Однако анализ статисти-

ческих данных, представленных службами средств измерений УГМС, показал наличие отказов, выявленных в процессе эксплуатации ФИ-2, среди которых отмечены случаи отказов блоков питания и индикации, оптико-электронного и измерительных блоков. Кроме того, имеют место метрологические отказы типа сбоя, вызванные занижением показаний относительно реальной видимости. В настоящее время серийный выпуск фотометров типа ФИ-2 прекращен и имеются трудности с заменой импульсных ламп ИСП-20, что стало основной причиной прекращения их эксплуатации. Средняя наработка до метрологического отказа фотометров типа ФИ-2 составляет $T_{cp} = 12,1$ мес, среднее квадратическое отклонение наработки $\sigma = 6,0$ мес.

Метрологическая надежность более совершенного фотометра типа ФИ-3 существенно выше ($T_{cp} = 21,92$ мес, $\sigma = 6,2$ мес) надежности фотометров типа ФИ-2 и соответствует надежности лучших зарубежных аналогов, что позволяет рекомендовать эти фотометры к использованию в составе АМИИС для категорированных аэропортов. Однако в некоторых случаях зафиксированы отказы реле блоков индикации, фотометрического блока (метрологические отказы типа сбоя). Часть ФИ-3 укомплектована импульсными лампами, и эти сбои вызваны нестабильностью уровня их излучения.

Наиболее высокие показатели метрологической надежности ($T_{cp} = 24,0$ мес, $\sigma = 6,2$ мес) имеют трансмиссометры типа MITRAS (производства фирмы «Вайсала»), стоимость которых значительно превышает стоимость лучших отечественных фотометров типа ФИ-3. Отказы финского трансмиссометра связаны в основном с загрязнением оптических блоков, смещением оптики из-за нестабильности грунта, метрологическими отказами типа сбоя, вызванного нестабильностью работы излучателя из-за влияния внешних условий, а также отказами ламп контроля загрязнения оптических блоков.

Измерители видимости фирмы «Пеленг» типа СФ-01 хорошо зарекомендовали себя на аэродромах Внуково и Коголым, однако показатели их метрологической надежности при эксплуатации существенно ниже, чем у зарубежных и других отечественных

фотометров ($T_{\text{cp}} = 12,6$ мес, $\sigma = 6,6$ мес). Основные типы метрологических отказов вызваны загрязнением оптических блоков, нарушением их настройки из-за нестабильности грунта, отказами электронных блоков.

Кроме указанных выше измерителей МДВ, на девяти аэродромах используются измерители прямого рассеяния (нефелометры) типа FD12 и FD12P (Домодедово, Минеральные Воды, Мурманск, Нижний Новгород, Тюмень, Иркутск, Новый Уренгой, Пермь, Валдай). Эти измерители имеют следующие недостатки: измерение МДВ осуществляется в объеме воздуха менее одного метра, что уменьшает репрезентативность результатов измерений видимости, а отсутствие возможности учета поглощения при измерении полного ослабления светового потока приводит к неоднозначным результатам измерений в различных атмосферных условиях (например, искажение видимости в твердых осадках). По этим причинам возникают метрологические отказы типа сбоя, которые трудно контролировать в оперативных условиях. Показатели метрологической надежности указанных выше измерителей МДВ ($T_{\text{cp}} = 14,5$ мес, $\sigma = 6,3$ мес) существенно ниже показателей надежности трансмиссометров типа MITRAS и отечественных фотометров типа ФИ-3.

В настоящее время на аэродромы в составе АМИИС поступает аналог финского трансмиссометра MITRAS — новый измеритель видимости типа LT31 производства фирмы «Вайсала», состоящий из базисного трансмиссометра и встроенного измерителя прямого рассеяния. Измеритель типа LT31 позволяет в автоматическом режиме определять видимость во всем требуемом диапазоне (от 50 м до 10 км и более). Характеристики его метрологической надежности при эксплуатации близки к показателям метрологической надежности трансмиссометра MITRAS. Однако, учитывая, что в настоящее время на авиаметсети имеется незначительное число измерителей типа LT31, показатели метрологической надежности этого прибора целесообразно уточнить после начала его широкого внедрения.

Метрологическая надежность измерителя параметров ветра. Как правило, почти на всех аэродромах эксплуатируются из-

мерители параметров ветра типа М63М различных модификаций (М-63, М-63М, М63М1) — они составляют около 90 % общего числа установленных на авиаметсети измерителей параметров ветра.

Оценка надежности этих приборов зависит от средней скорости ветра на месте их эксплуатации. Средняя наработка до метрологического отказа анеморумбометров М-63М и их модификации составляет от 12,1 до 24,6 мес в зависимости от условий эксплуатации.

Более 60 % приборов имеет продленный ресурс, и значительная их часть (около 30 %) требует замены. Основная доля отказов вызвана сбоями в работе индикаторного устройства (пульта), увеличением моментов трения в осях ветроприемников, недостаточной чувствительностью. Кроме этого, анеморумбометры М63М не обеспечивают одновременное скользящее осреднение скорости и направления ветра за 2 и 10 мин и скользящий выбор максимальной и минимальной скорости ветра.

Эксплуатируемые на сети АМСГ первичные измерительные преобразователи (датчики) параметров ветра типа М-127, М-127мп, ИПВ01-01 и финские датчики типа WAA151/WAV151 (фирма «Вайсала») имеют более высокие показатели надежности, чем анеморумбометры М63М:

Датчик	М = 127	М = 127мп	WAA151/WAV151
T_{cp} мес	24,6	28,9	36,1
σ мес	12,3	14,5	6,7

(при условии выполнения профилактических операций по смазке подшипника). Основные причины отказов вызваны износом механических элементов конструкции, увеличением моментов трения подшипников и снижением чувствительности из-за влияния низких температур.

На авиационной метеосети Росгидромета с 2006 г. применяется свыше 130 автономных измерителей параметров ветра типа ИПВ-01 (ОАО «Гидрометприбор», Москва). Показатели метрологической надежности ИПВ-01 существенно ниже показателей указанных выше приборов и составляют: $T_{cp} = 12,6$ мес, $\sigma = 6,2$ мес. Основные отказы вызваны, прежде всего, износом подшипника, увеличением

моментов трения подшипника, замерзанием при низких температурах, нестабильностью измерения направления ветра. Требуется доработка конструкции ИПВ-01, а также дооснащение вертушки данного прибора термоблоком для обогрева в зимних условиях.

Метрологическая надежность датчиков ветра типа 05103 фирмы "R. M. Young" (США), которые входят в состав комплексов типа МКС, внедряемых в настоящее время на сети Росгидромета, характеризуется средней наработкой до метрологического отказа $T_{cp} = 28,4$ мес и СКО наработки $\sigma = 6,6$ мес, что существенно превышает показатели надежности ИПВ-01. Основные причины отказов датчиков ветра фирмы "R. M. Young" связаны с увеличением моментов трения при воздействии низких температур и обледенением чувствительных элементов конструкции (винтов).

Параметры метрологической надежности измерителей параметров ветра типа «Пеленг СФ-03» (ОАО «Пеленг», Минск) и финских измерителей WIND30 фирмы «Вайсала» в настоящее время не исследованы, так как пока эти измерители не получили широкого распространения на сети АМСГ Росгидромета. Однако представляется целесообразным проведение исследований их метрологической надежности в условиях эксплуатации.

Метрологическая надежность измерителей высоты нижней границы облаков. Более половины эксплуатируемых на авиаметеоологической сети измерителей высоты нижней границы облаков (ВНГО) имеют продленный ресурс. В основном это касается несертифицированного оборудования типа РВО-2М и ИВО-1М, которое выпускалось до 1991 г. и составляет около 52 % общего числа измерителей ВНГО. Наибольшее число отказов и соответственно наихудшие показатели надежности характерны для измерителей типа ИВО-1М. Средняя наработка до метрологического отказа ИВО-1М составляет $T_{cp} = 12,48$ мес, СКО наработки $\sigma = 4,32$ мес. Исследование метрологической надежности измерителей ВНГО типа РВО-2, РВО-2М, ИВО-1М приведены в одной из работ автора (Окоренков, 1990).

Измерители высоты нижней границы облаков типа ДВО-2 (производства ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла») в

настоящее время составляют около 30 % общего числа измерителей ВНГО, установленных на аэродромах. В отличие от прибора ДВО, представляющего собой первичный измерительный преобразователь (датчик) системы КРАМС-2, в состав автономного измерителя ДВО-2 входит микропроцессорный пульт для преобразования и отображения результатов измерения и возможности сопряжения с ПЭВМ любой системы АМИС в коде ASCII. Средняя наработка до метрологического отказа ДВО-2 $T_{cp} = 22,3$ мес, СКО наработки $\sigma = 10,1$ мес, что существенно выше соответствующих показателей для измерителей типа ДВО.

Измерители ВНГО типа ДВО, ДВО-2 имеют следующие виды отказов: явные отказы индикации (пульта), блока питания, связанные с применением недостаточно надежных комплектующих в высоковольтных блоках; отказы ламп (ИСШ-100, ФЭУ-1, 6Ж9П), высоковольтных конденсаторов, трансформатора ТАН 16-220-50. Для обеспечения надежности ДВО-2 необходимо проведение его модернизации (или замены на разрабатываемые в настоящее время измерители типа ДВО-3) и применение более надежных элементов конструкции.

На ряде аэродромов в составе АМИИС эксплуатируются финские лазерные датчики высоты нижней границы облаков типа СТ-25К, работоспособность которых получила на местах высокие оценки. Средняя наработка до отказа облакомеров типа СТ-25К составляет $T_{cp} = 36,8$ мес, СКО $\sigma = 9,2$ мес. Однако имеют место отказы процессорных блоков ($T_{cp} = 12,5$ мес, $\sigma = 6,1$ мес), кондиционеров ($T_{cp} = 18,0$ мес, $\sigma = 6,2$ мес) и электронных компонентов. Метрологические отказы облакомеров типа СТ-25К в основном связаны и отказами блоков излучателя (потеря мощности) и приемника (потеря чувствительности).

Метрологическая надежность измерителей атмосферного давления. На сети авиаметеорологических станций для измерения атмосферного давления наибольшее распространение получили барометры ртутные чашечные типа СР-А и СР-Б, которые имеют высокие показатели надежности, несмотря на длительные сроки эксплуатации, часто превышающие 20 лет. Средняя наработка до

метрологического отказа ртутных барометров типа СР-А, СР-Б ($T_{\text{cp}} = 118,56$ мес, $\sigma = 64,44$ мес) существенно превышают показатели метрологической надежности датчиков атмосферного давления АМИИС. Основные причины отказов ртутных барометров, функции дрейфа систематической и случайной составляющих основной погрешности были изложены в одной из работ автора (Окоренков, 1990).

Аэродромы, не оборудованные автоматизированными метеосистемами типа АМИИС, располагают резервными комплектами указанных барометров. Однако их производство прекращено с 1993 г. Потребность в барометрах возрастает с вводом требования ВМО/ИКАО по резервированию на всех аэродромах гражданской авиации измерителей атмосферного давления, непосредственно влияющего на безопасность взлета и посадки воздушных судов.

На ряде аэродромов (около 10 %) установлены и используются в качестве резерва автономные измерители атмосферного давления типа БРС-1М, получившие на местах положительную оценку работоспособности за высокие показатели надежности при отсутствии отказов в период эксплуатации. Средняя наработка до метрологического отказа барометров типа БРС-1М (и их модификаций БРС-1М-1, БРС-1М-2, БРС-1М-3) составляет $T_{\text{cp}} = 39,07$ мес, СКО наработки $\sigma = 5,74$ мес. Барометры типа БРС-1М сертифицированы Госстандартом РФ и Комиссией МАК в составе АМИИС-2000 и допущены Росгидрометом для применения на сети. Результаты исследования метрологической надежности барометров типа БРС-1М-1, БРС-1М-2, БРС-1М-3 были опубликованы автором ранее (Окоренков, 2007) и в данной работе не приводятся.

На аэродромах, оборудованных АМИИС, в качестве первичных измерительных преобразователей, кроме указанных выше датчиков типа БРС-1-М, используются датчики атмосферного давления (ДД) станции КРАМС-2 и сертифицированные финские датчики РТВ220. Надежность механической конструкции датчиков атмосферного давления КРАМС-2 достаточно высока. Средняя наработка до метрологического отказа датчика давления (ДД) систем КРАМС-2 $T_{\text{cp}} = 26,21$ мес, $\sigma = 13,1$ мес. Отказы ДД КРАМС-2 свя-

заны в основном с потерей герметичности измерительного сильфона и износом механических элементов конструкции. Средняя наработка до метрологического отказа датчиков давления типа РТВ220 ($T_{\text{cp}} = 36,5$ мес, $\sigma = 5,5$ мес) близка к соответствующему параметру надежности барометров БРС-1М. Отказы в основном связаны с повышенной чувствительностью измерительной схемы и дрейфом характеристик чувствительных элементов.

В качестве первичных измерительных преобразователей температуры и влажности на аэродромах, оборудованных АМИИС, широко используются финские датчики типа НМР45D, имеющие более высокие показатели метрологической надежности ($T_{\text{cp}} = 25,2$ мес, $\sigma = 12,2$ мес) по сравнению с отечественными датчиками влажности типа ДВ-2 ($T_{\text{cp}} = 12,5$ мес, $\sigma = 7,1$ мес). Основные типы отказов вызваны, прежде всего, старением и загрязнением чувствительных элементов датчиков.

Датчики температуры воздуха типа ТСП-002 и датчики влажности воздуха типа ЮКФВ.411552.001 используются в системе типа АМИС-1. Средняя наработка до метрологического отказа датчика температуры типа ТСП-002 составляет 24,0 мес, а датчика влажности воздуха типа ЮКФВ.411552.001 не превышает 6,0 мес. Главная причина метрологических отказов — дрейф основной погрешности из-за нестабильности чувствительных элементов.

В системах типа КРАМС-2 используется блок датчиков температуры и влажности типа БДТВ, включающий платиновые термометры сопротивления типа ПТС-500, психрометрический датчик влажности на основе сухого и смоченного термометров типа ПТС-500 и датчика влажности на основе животной пленки или волосяной гитары. Средняя наработка до метрологического отказа (T_{cp}) датчика температуры типа ПТС-500 составляет 60,0 мес, а психрометрического датчика влажности — 12,6 мес. Отказы вызваны в основном износом щеток aspirатора и загрязнением системы увлажнения. Средняя наработка до метрологического отказа (T_{cp}) датчика влажности КРАМС-2 на основе волосяной гитары составляет 6,0 мес. Метрологические отказы вызваны в

основном потерей чувствительности датчика из-за пересыхания волосяной гитары и ее загрязнения.

Полученные выше оценки наработки до метрологического отказа аэродромных АМИИС, эксплуатируемых на авиаметсети Росгидромета, позволяют в соответствии с Рекомендациями РМГ 74—2004 определить оптимальные по критериям надежности межповерочные интервалы (МПИ), которые, как указано выше, зависят от метрологической надежности датчиков, входящих в конфигурацию АМИИС, влияния климатических условий на местах эксплуатации систем, периодичности их технического обслуживания и т. п.

Заключение

В результате анализа состояния парка аэродромных АМИИС, эксплуатируемых на авиаметсети Росгидромета, выявлены основные причины их отказов и получены оценки средней наработки до метрологического отказа основных типов метеорологических датчиков, входящих в их состав. Оценки показателей метрологической надежности АМИИС позволяют определить их оптимальные межповерочные интервалы с учетом реальных условий эксплуатации. Оценки показателей метрологической надежности метеорологических датчиков, входящих в состав АМИИС, позволяют рекомендовать наиболее надежные их них для создания отказоустойчивых аэродромных и сетевых АМИИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

МИ 2918—2005 (2006). ГСИ. Анализ состояния и прогнозирование основных показателей метрологической надежности гидрометеорологических средств измерений / Разработчик В. Ю. Окоренков. — СПб.: Астерион. — 18 с.

Окоренков В. Ю. (1982). Расчет и прогнозирование метрологической надежности средств измерений на основе метода имитационно-вероятностного моделирования процесса их эксплуатации. — Труды ГГО, вып. 465, с. 97—101.

Окоренков В. Ю. (1985а). Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений. — Труды ГГО, вып. 476, с. 40—66.

Окоренков В. Ю. (1985б). Система моделирования функционирования парка метеорологических средств измерений. — Обнинск: ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, инв. № 051050923.

Окоренков В. Ю. (1985в). Автоматизированная система управления, контроля метрологической надежности парка средств измерений. — Обнинск: ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, инв. № 0240.

Окоренков В. Ю. (1987). Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений. — Обнинск: ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, инв. № 051050923.

Окоренков В. Ю. (1989). Автоматизированная система обнаружения метрологических отказов метрологических средств измерений. — Обнинск: ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, инв. № 41070.

Окоренков В. Ю. (1990а). Исследование метрологической надежности метеорологических термометров. — Труды ГГО, вып. 529, с. 119—124.

Окоренков В. Ю. (1990б). Исследование надежности средств измерений метеорологической дальности видимости и высоты нижней границы облаков. — Труды ГГО, вып. 529, с. 131—145.

Окоренков В. Ю. (1990в). Метрологическая надежность средств измерений скорости воздушного потока. — Труды ГГО, вып. 529, с. 125—130.

Окоренков В. Ю. (1990г). Исследование метрологической надежности средств измерений атмосферного давления. — Труды ГГО, вып. 529, с. 146—155.

Окоренков В. Ю. (1990д). Основные аспекты метрологической надежности метрологических средств измерений.

Окоренков В. Ю. (2006). Методы и средства поверки метеорологических информационно-измерительных систем и средств измерений. — СПб.: Астерион. — 519 с.

Окоренков В. Ю. (2007). Результаты экспериментальных исследований метрологической надежности нового поколения вибрационно-частотных эталонных барометров типов БОП-1, БОП-1М, БРС-1, БРС-1М-1, БРС-1М-2, БРС-1М-3. — Труды ГГО, вып. 556, с. 179—191.

Окоренков В. Ю., Кусуров В. И. (1990). Обнаружение метрологических отказов метеорологических средств измерений. — Труды ГГО, вып. 529, с. 105—118.

Окоренков В. Ю., Фатеев Н. П. (1989а). Исследования метрологической надежности деформационных барометров. — Труды ГГО, вып. 522, с. 28—35.

Окоренков В. Ю., Фатеев Н. П. (1989б). Исследование метрологической надежности средств измерений влажности воздуха и осадков. — Труды ГГО, вып. 522, с. 19—27.

Рекомендации. МИ 2713—2008 (2008). ГСИ. Автоматизированные метеорологические измерительно-информационные системы. Методика поверки / Разработчик В. Ю. Окоренков. — М., СПб.: Астерион. — 90 с.

РМГ 74-2004 (2005). Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. — М.: Стандартинформ. — 21 с.

Черкесов Г. Н. (2005). Надежность аппаратно-программных комплексов. — СПб.: Питер. — 478 с.

УДК 551.58.001.57

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ У ВЕРХНЕЙ КРОМКИ УРАГАНА

А. А. Кохановский

Институт дистанционного зондирования
Бременский Университет, Аллея О. Ганна 1, Бремен, 28334 Германия
alexk@iup.physik.uni-bremen.de
Institute of Environmental Physics, University of Bremen
O. Hahn Allee 1, D-28359 Bremen, Germany

Поступила в редакцию 24.03.2010
Поступила после доработки 1.04.2010

Введение

Исследования микрофизических и радиационных характеристик ураганов имеют большое практическое значение. Данные натурных измерений показывают, что размеры кристаллов в верхней части ураганов могут быть довольно большими — около 0,2 мм (Heymtsfield et al., 2006). Значения водозапаса обычно находятся в диапазоне 1—20 кг/м² (Jiang, Zipser, 2004). Детальные исследования ураганов с использованием обратного рассеяния солнечного света являются редкими, несмотря на то что изображения ураганов, полученные с использованием космической аппаратуры, знакомы всем из телевизионных передач. Водозапас ураганов, а также средний размер капель и кристаллов можно получить из анализа спектральных коэффициентов яркости. Физический анализ спутниковых снимков может расширить наши знания о развитии, движении и усилении тропических циклонов (Simpson, 2002).

При изучении ураганов недостаток оптических измерений по сравнению с микроволновым дистанционным зондированием состоит в том, что удастся получать информацию только с верхней части урагана (например, размеры частиц). Изучение вертикальной структуры урагана остается недоступным.

Первые исследования в этом направлении были проведены с использованием изображений SeaWiFS и MODIS (Kokhanovsky,

von Houningen-Huene, 2004; Kokhanovsky, Nauss, 2005). Преимущество MODIS заключается в том, что он выполняет измерения не только в видимом диапазоне, но и в ИК, и это позволяет определить положение верхней кромки урагана, а также средние размеры кристаллов вблизи верхней границы.

В этой работе мы используем данные MODIS для исследования микроструктуры урагана «Катрина».

1. Методика определения размеров кристаллов

Для получения оптических и микрофизических характеристик урагана «Катрина» мы использовали полуаналитический алгоритм, разработанный в Бременском университете (Kokhanovsky et al., 2003; Kokhanovsky, Nauss, 2005). Алгоритм позволяет получить положение верхней границы урагана, оптическую толщину облаков, альбедо облака, размер кристаллов либо характерную длину поглощения света (Λ) в кристалле (particle absorption length, PAL) и водозапас. Величина PAL пропорциональна эффективному радиусу частиц a_0 (Kokhanovsky, Nauss, 2005):

$$\Lambda = Aa_0. \quad (1)$$

Эффективный радиус частицы определяется как $3V/S$ (V — средний объем частиц и S — их средняя площадь поверхности). Коэффициент пропорциональности зависит от формы частиц. В частности, можно показать (Kokhanovsky, Nauss, 2005), что $\Lambda = 1,8$ для сферических частиц и $\Lambda = 2,4$ для гексогональных призм с отношением длины к стороне, равном 2,0. Зависимость Λ от формы частиц незначительна. В связи с этим в данной работе мы приводим пространственные распределения Λ , а не a_0 . Переход к a_0 осуществляется при помощи формулы (1) и в предположении о форме кристаллов вблизи верхней границы урагана.

Величина Λ определяет вероятность поглощения фотона (ВПФ) в облаке β (Kokhanovsky, Nauss, 2005) на длине волны λ :

$$\beta = [1 - \exp(-\Lambda / \Lambda_0)]\beta_\infty, \quad (2)$$

где

$$\Lambda_0 = \frac{\lambda}{4\pi\chi(\lambda)}. \quad (3)$$

Здесь χ — мнимая часть показателя преломления льда, β_∞ — ВПФ в предположении $\chi a_0/\lambda \rightarrow \infty$. В этом случае все фотоны, прошедшие внутрь кристалла, поглощаются, и ВПФ определяется исключительно отраженным светом и может быть легко рассчитана по формулам геометрической оптики. Эти расчеты показывают, что вероятность поглощения фотона β_∞ в больших выпуклых кристаллах при их хаотической ориентации в предположении, что все лучи, проникшие внутрь частицы, поглощаются, равна 0,47 (Kokhanovsky, 2006).

Как правило, для получения размеров кристаллов проводятся измерения на длине волны 1,6 мкм. Глубина проникновения фотонов в ураган на этой длине волны очень мала, поэтому мы решили использовать длину волны 1,24 мкм. Это дает возможность более глубокого проникновения излучения в ураган (Kokhanovsky, 2004). Таким образом, пространственное распределение $\Lambda(x, y)$ было получено из измеренного спектрального коэффициента яркости (СКЯ):

$$R = \frac{\pi I}{\cos(\text{SZA})E_0} \quad (4)$$

при $\lambda = 1,24$ мкм. Здесь I — интенсивность отраженного света, SZA — зенитный угол Солнца, E_0 — освещенность на верхней границе атмосферы.

Было обнаружено, что отражательная способность R (1,24 мкм) больше вблизи глаза урагана. Мы предполагаем, что это связано с меньшим поглощением вследствие меньших размеров кристаллов в этом регионе. По всей вероятности, обнаруженный эффект связан с гомогенной нуклеацией льда за счет быстрого переноса и замораживания капель в сильном восходящем потоке воздуха. Это и приводит к высокой концентрации сравнительно мелких частиц в верх-

ней части урагана (вблизи центра). Затем кристаллы переносятся ближе к краю, где их концентрация падает, а размер возрастает (за счет агрегации). Это приводит к уменьшению яркости урагана на данной длине волны при удалении от его центра.

Мы использовали код SACURA (Kokhanovsky et al., 2003) для восстановления β (и Λ) по значениям R (1,24 мкм). В частности, для случая оптически толстых облаков использовалось следующее соотношение между R (1,24 мкм) и β (Kokhanovsky et al., 2003; Kokhanovsky, Nauss, 2005):

$$R(1,24 \text{ мкм}) = R_0 \exp(-\Phi \sqrt{\beta/3(1-g)}), \quad (5)$$

где R_0 — СКЯ при отсутствии поглощения, $\Phi = 4R_0 / K(\mu)K(\mu_0)$, $K(\mu) = 3(1+2\mu)/7$, $\mu = \cos(\vartheta)$, $\mu_0 = \cos(\text{SZA})$, ϑ — угол наблюдения. Предполагалось, что средний косинус угла рассеяния g не зависит от размеров кристаллов и равен 0,75 (Kokhanovsky, 2006). Так же использовались расчеты R_0 в предположении фрактальной формы ледяных частиц (Macke et al., 1996; Kokhanovsky, 2006). Понятно, что практически во всей области ураган может рассматриваться как полубесконечный слой при $\lambda = 1,24$ мкм. Именно в этом случае и можно пользоваться формулой (5).

2. Пространственное распределение размеров ледяных частиц

Ураган «Катрина» возник как тропическая депрессия 23 августа 2005 г. (23,2° с. ш., 75,5° з. д.). Его траектория показана на рис. 1. Ураган распространялся сначала на северо-запад, потом на запад, на север, а затем на северо-восток (после выхода на берег в Новом Орлеане). Соответствующая система была классифицирована как тропический шторм «Катрина» 24 августа. 25 августа «Катрина» был классифицирован как ураган четвертой категории. Позже, утром, ураган прошел через стадию быстрого усиления с максимальной скоростью ветра 281 км/ч (порывы до 344 км/ч) и давлением в центре 906 гПа и был классифицирован как ураган пятой категории. 29 августа скорость ветра несколько уменьши-

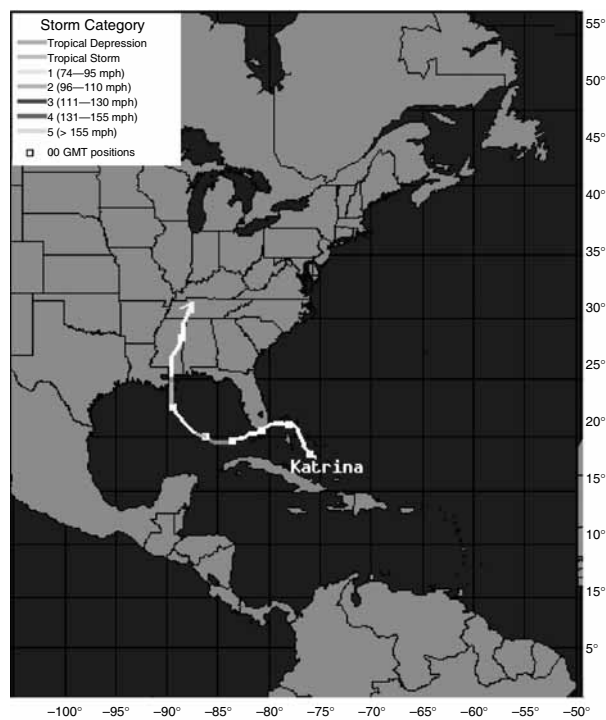


Рис. 1. Траектория урагана «Катрина».

<http://www.wunderground.com/hurricane/at200512.asp>

лась, и урагану была присвоена четвертая категория. На следующий день ураган «Катрина» прекратил свое существование и превратился в тропическую депрессию ($36,3^\circ$ с. ш., $87,5^\circ$ з. д.).

Мы провели анализ микрофизических характеристик урагана «Катрина» от зарождения до распада. Использовался инструмент MODIS с пространственным разрешением в надир, равным 1 км. Анализировались данные спутниковых измерений за 24—29 августа 2005 г. Данные измерений за 29 августа 2005 г. соответствуют положению урагана над Нью-Орлеаном.

Пространственные распределения $\Lambda(x, y)$ с разрешением 1 км, а также соответствующие частотные распределения приведены на рис. 2 и 3 для разных этапов развития урагана. Из рисунков

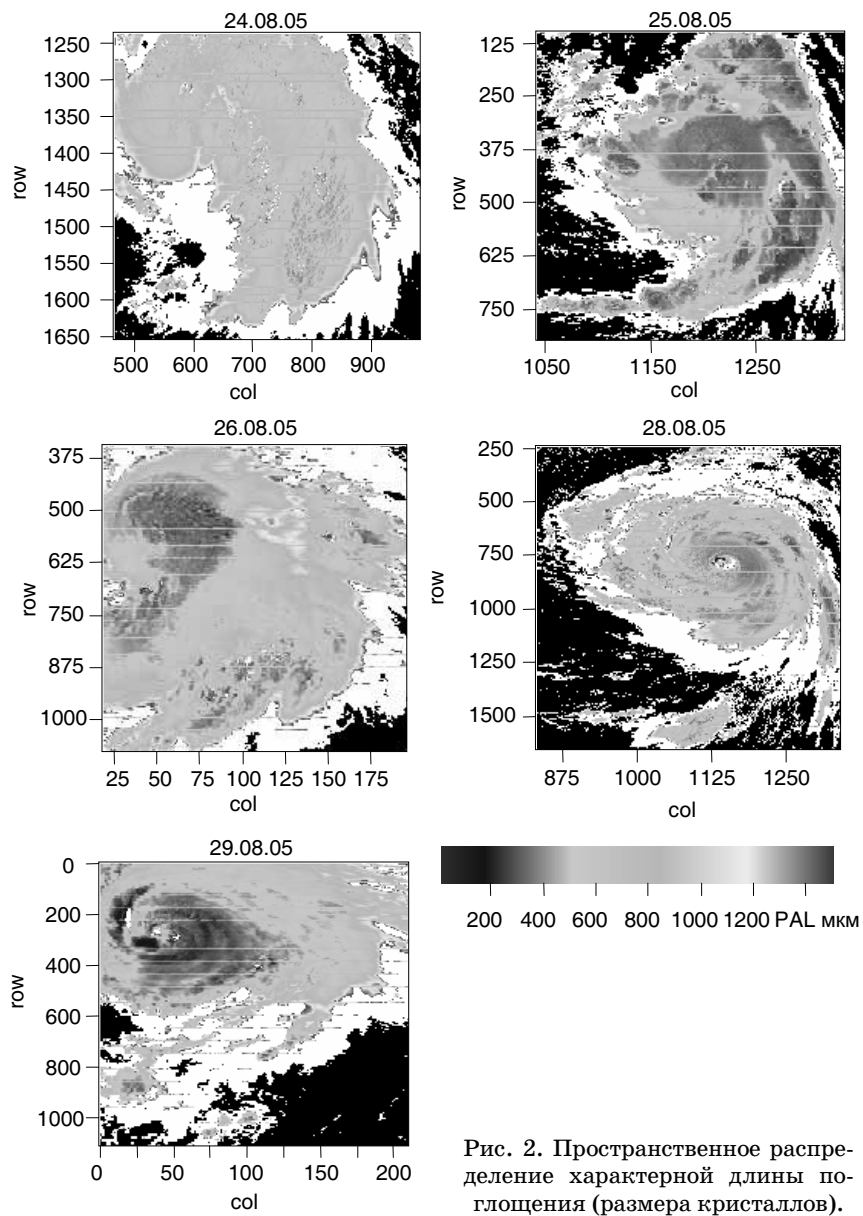


Рис. 2. Пространственное распределение характерной длины поглощения (размера кристаллов).

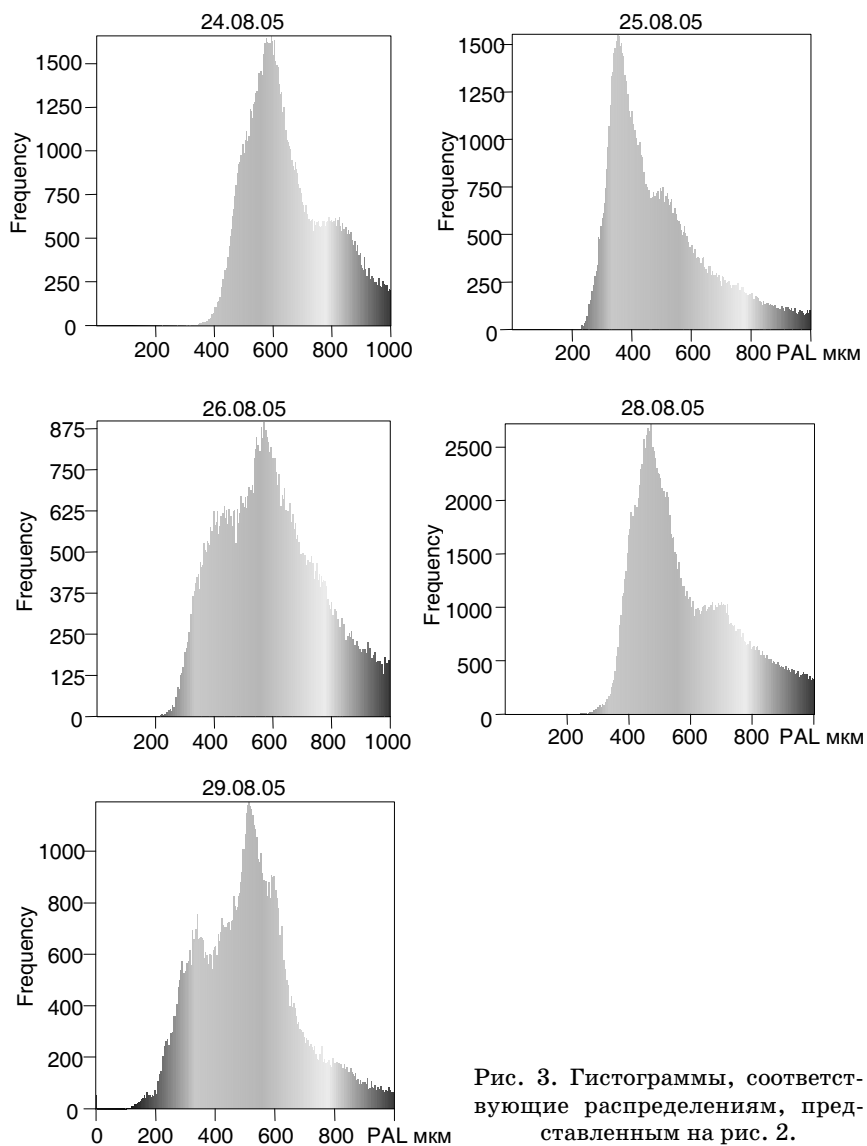


Рис. 3. Гистограммы, соответствующие распределениям, представленным на рис. 2.

следует, что PAL находится в диапазоне 0,2—1,0 мм. Таким образом, соответствующие эффективные радиусы для гексагональных рассеивателей равны 0,08—0,4 мм. Интересно отметить, что распределение имеет две моды, и это не артефакт. Такое бимодальное распределение существует также для R (1,24 мкм). Наличие двух мод может быть связано с различными процессами образования частиц (гомогенная нуклеация и агрегация).

Максимум более выраженной моды находится в диапазоне 0,4—0,6 мм для большинства случаев. Чаще всего значение PAL колеблется около значения 0,5 мм при прогрессировании урагана «Катрина» от тропической депрессии (23 августа) до бури — урагана — бури и снова тропической депрессии (30 августа) (см. рис. 3).

Мы видим, что пространственное распределение PAL довольно равномерное на первой стадии образования урагана (24 августа) (тропический шторм «Катрина»). Затем распределение становится неоднородным, как видно из данных за 25 августа (см. рис. 2). В частности, проявляется характерная круговая структура урагана. Область с более мелкими частицами на рис. 2 (25 августа 2005 г.) находится рядом с будущим положением глаза урагана. Это может быть объяснено процессами гомогенной нуклеации (Neumsfield et al., 2006).

Неоднородная область с PAL в диапазоне около 0,8 мм формируется 26 августа. Это связано с процессами агрегации ближе к внешней зоне урагана. Частицы льда рядом с центром урагана остаются весьма малы из-за сильных вертикальных движений и возможной гомогенной нуклеации.

Ураган достигает максимальной силы 28 августа. Эта мощная система движется в сторону Нового Орлеана. Вращение делает распределение кристаллов более равномерным по сравнению с более ранними стадиями развития урагана. Интересно, что величина PAL распределена концентрически с меньшими значениями ближе к центру, как в центрифуге. Сильные восходящие потоки в центре урагана приводят к образованию мелких кристаллов, которые предположительно растут за счет процессов агрегации при транспортировке во внешней зоне. Это подтверждает сделанные ранее выводы (см. рис. 11 в работе Neumsfield et al. (2006)).

Измерения, проведенные 29 августа, также свидетельствуют о распределении частиц по размерам с более мелкими частицами ближе к центру. Облака, расположенные ближе к центру (стена урагана), как правило, очень высокие — до 15 км по данным радиолокационных наблюдений (см., например, веб-сайт НАСА http://www.trmm.gfc.nasa.gov/trmm_rain/Events). Это приводит в целом к меньшим размерам кристаллов в стене по сравнению с размерами на периферии (в связи с общим уменьшением размеров кристаллов с высотой). Концентрическая структура распределения $\Lambda(x, y)$ позволяет предположить, что распределение осадков тоже должно иметь подобную круговую структуру. Это связано с увеличением интенсивности осадков для районов с более крупными кристаллами и подтверждается радиолокационными данными для урагана «Катрина», приведенными на сайте, адрес которого указан выше.

Заключение

Мы обнаружили, что средний размер частиц в верхней части урагана «Катрина» был больше на начальном этапе его формирования, 24 августа 2005 г. (около 0,6 мм, см. рис. 2). На следующий день средний размер частиц уменьшился до 0,2 мм, возможно, из-за наличия сильных восходящих потоков. В стадии максимального развития урагана (пятая категория, 28 августа 2005 г.) средние размеры частиц в основном составляли 0,4—0,6 мм. Эти размеры соответствуют так называемой длине поглощения Λ (Kokhanovsky, Nauss, 2005). Меньшие размеры кристаллов ближе к глазу урагана предполагают возможность существования событий гомогенной нуклеации с переносом частиц на периферию и увеличением их размеров за счет агрегации.

Результаты оптических наблюдений с пространственным разрешением 1 км, использованные выше (особенно, если они проводятся с геостационарных спутников), могут оказаться полезными для разработки и тестирования динамических моделей ураганов, что приведет к лучшему пониманию пространственного распределения микрофизических параметров ураганов.

Автор выражает благодарность НАСА за предоставленные спутниковые данные MODIS, а также Weather Underground Inc за своевременное размещения данных об урагане «Катрина» в Интернете. Автор признателен А. Heymsfield и W. von Hoyningen-Huene за обсуждение основных результатов этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jiang H., Zipser E.J. (2004). A combined radar-radiometer algorithm to estimate hydrometeor profiles in tropical cyclones. — Proc. Atm. Rad. Symp., CD ROM.
- Heymsfield A.J., Bansemmer A., Durden S.L., Herman R.L., Bui T.P. (2006). Ice microphysics observations in hurricane Humberto: comparison with non-hurricane-generated ice cloud layers. — J. Atmos. Sci., V. 63, p. 288—308.
- Kokhanovsky A.A., Rozanov V.V., Zege E.P., Bovensmann H., Burrows J.P. (2003). A semi-analytical cloud retrieval algorithm using backscattered radiation in 0,4—2,4 micrometers spectral range. — J. Geophys. Res., V.D108. 10.1029/2001JD001543.
- Kokhanovsky A.A. (2004). The depth of sunlight penetration in cloud fields for remote sensing. — IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., V. 2, p. 242—245.
- Kokhanovsky A., von Hoyningen-Huene W. (2004). The optical properties of a hurricane. — Atmos. Res., V. 69, p. 165—183.
- Kokhanovsky A.A., Nauss T. (2005). Satellite based retrieval of ice cloud properties using a semi-analytical algorithm. — J. Geophys. Res., doi:10.1029/2004JD005744.
- Kokhanovsky, A.A. (2006). Cloud optics. — Springer-Praxis, Berlin. — 254 p.
- Macke A., Mueller J., E. Raschke E. (1996). Single scattering properties of atmospheric ice crystals. — J. Atmos. Sci., V. 53, p. 2813—2825.
- Simpson R., ed. (2004). Hurricane! Coping with disaster. — Amer. Geophys. Union, Washington. — 234 p.

УДК 551.576

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА АТМОСФЕРОЙ

Г. Г. Щукин, В. Д. Степаненко, А. В. Снегуров

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7
shchukin@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 15.02.2010

Поступила после доработки 26.03.2010

Как известно, в конце 40-х — начале 50-х годов прошлого столетия начались работы в области применения импульсной радиолокации для решения метеорологических задач, что положило начало новому научно-техническому направлению радиолокационной метеорологии (Атлас, 1967; Степаненко, Щукин, 2001).

В конце 50-х — начале 60-х годов были начаты работы по применению в метеорологии радиолокаторов, работающих в пассивном режиме, принцип действия которых основан на приеме собственного теплового излучения атмосферы (Степаненко и др., 1987).

Особую значимость для исследования облачности и осадков в метеорологии приобрела в середине 60-х — начале 70-х годов разработка методов, основанных на совместном применении активно-пассивных комплексов, в состав которых входят метеорологический радиолокатор, работающий в активном режиме, и микроволновая радиометрическая аппаратура (Щукин, Булкин, 2009).

Представляется целесообразным рассмотреть основных потребителей активно-пассивной радиолокационной метеорологической информации (РМИ), получаемой в настоящее время в интересах различных потребителей (табл. 1).

Таблица 1

Перечень потребителей радиометеорологической информации

№ п/п	Потребители радиометеорологической информации	Содержание радиометеорологической информации
1	Прогностические подразделения УГМС; авиация, в том числе корабельная; железнодорожный и автомобильный транспорт	Штормовые оповещения об облаках и связанных с ними опасных явлениях (ливни, грозы, град, шквалы, смерчи); распознавание; местоположение, геометрические размеры, горизонтальная и вертикальная скорости и направление движения, турбулентность, эволюция; сверхкраткосрочный прогноз по радиолокационным и радиометрическим данным. Определение местоположения переохлажденных зон облаков, их горизонтальных и вертикальных размеров, а также оценка интенсивности обледенения ЛА, получение информации о гололеде на ЛЭП, аэродромах и транспорте
2	Гидрология	Местоположение, интенсивность выпадающих на подстилающую поверхность осадков, их продолжительность, количество, фазовое состояние; сверхкраткосрочный прогноз осадков, паводков, оползней и лавин
3	Экология, безопасность жизнедеятельности	Независимый дистанционный мониторинг аварийных ситуаций на АЭС, определение размеров и ориентации факела радиоактивных аварийных выбросов, степени вымывания их выпадающими осадками с целью более точного определения местоположения зон радиоактивного загрязнения местности
4	Тестирование численных моделей облаков по радиолокационным и самолетным данным	Разработка методики тестирования с учетом выбранных для составления физических и радиолокационных данных облаков и связанных с ними явлений погоды. Проведение полевых экспериментов, обработка и анализ получаемых результатов указанного тестирования
5	Активные воздействия	Применение МРЛ и лидаров в работах по АВ с целью рассеяния облаков и туманов, вызывания дополнительных осадков для с/х и туше-

Окончание табл. 1

№ п/п	Потребители радиометеорологической информации	Содержание радиометеорологической информации
6	Обеспечение пусков баллистических ракет и орбитальных космических аппаратов (КА «Буран» и др.)	ния лесных пожаров, а также для ослабления грозо-градовых процессов и смерчеопасных облаков; осуществление АВ, определение их эффективности Получение радиолокационной информации об опасных мощных конвективных облаках, их грозовой активности, сверхкраткосрочный прогноз по радиолокационным и грозопеленгационным данным для метеообеспечения. Дистанционное получение характеристик ветра по высотам (профилемеры)
7	Подспутниковые эксперименты	Сопоставление данных МРЛ об облаках и связанных с ними явлениях с информацией, получаемой с помощью спутниковой аппаратуры различного диапазона с целью определения качества информации, получаемой с ИСЗ (валидация)
8	Океанология	Измерение характеристик волнения морской поверхности и изучение некоторых параметров ледяного покрова в прибрежных условиях (в шельфовых зонах)
9	Теоретические и экспериментальные исследования распространения радиоволн в атмосфере и атмосферных образованиях	Разработка руководящих документов по применению МРЛ, разработка требований к новому поколению комплексов, а также выполнение ОКР

Состояние сети МРЛ и ее задачи

Основная задача МРЛ — штормооповещение об опасных явлениях погоды, связанных с облаками (ливень, гроза, град, смерч и др.).

В автоматизированных МРЛ, работающих на сети, выдается следующая информация:

радиолокационная отражаемость Z в любом горизонтальном сечении,

радиолокационная отражаемость Z в любом заданном вертикальном сечении (разрезе);

интенсивность и количество осадков;

высота верхней (H_v) и нижней (H_r) границ облаков и проекции на горизонтальную плоскость;

опасные явления (гроза, ливень, град) в проекции на горизонтальную плоскость;

скорость и направление перемещения облаков и зон, связанных с опасными явлениями погоды.

В качестве примера на рис. 1 представлена радиолокационная карта облаков и связанных с ними явлений, полученная с автоматизированного радиолокатора МРЛ-5 в пос. Воейково (Ленинградская область). Здесь же представлен вертикальный профиль радиолокационной отражаемости в сечении облака.

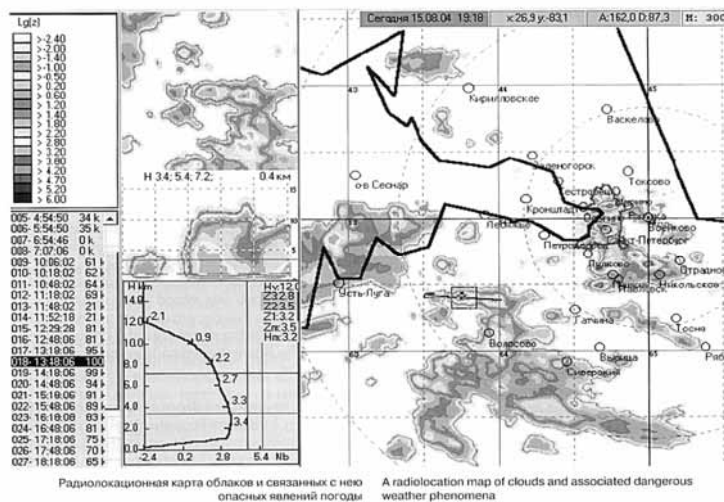


Рис. 1. Радиолокационная карта облаков и связанных с ними опасных явлений погоды.

Слева сверху — распределение радиолокационной отражаемости Z в квадрате 30×30 км, слева внизу — вертикальный разрез облака и профиль Z .

К концу 80-х годов сеть штормооповещения СССР состояла из 126 МРЛ и действовала по единой методике, разработанной специалистами ГГО. Размещение МРЛ проходило с учетом радиуса их действия по обнаружению опасных явлений погоды, связанных с облаками, и потребности в этой информации различных отраслей народного хозяйства. МРЛ были размещены в каждой зональной гидрометеорологической обсерватории, в аэропортах II класса и в крупных городах — таким образом, чтобы основные промышленные и сельскохозяйственные районы и авиатрассы с интенсивной грозовой деятельностью перекрывались радиолокационной информацией. В настоящее время сеть МРЛ России сократилась и насчитывает всего 36 МРЛ (31 МРЛ-5 и пять МРЛ-2), расположенных в основном в аэропортах.

Развитие радиометеорологических наблюдений

В настоящее время ведется изготовление отечественного многопараметрического доплеровского метеорологического радиолокатора. К 2015 г. в аэропортах и на сети Росгидромета предполагается установить примерно 170 ДМРЛ.

Введение когерентного режима в радиолокаторе позволяет, как известно, получать дополнительную информацию о цели — ее радиальную скорость. За счет такой информации становится возможным решение принципиально иных, чем при использовании некогерентных МРЛ, задач, и в частности более достоверное измерение скорости перемещения облаков, осадков, гроз, ливней, града и смерча, а также скорости движения рассеивающих частиц внутри них в радиальных направлениях.

Доплеровский МРЛ способен проводить наблюдения в двух режимах: *Скорость* и *Отражаемость*. В последнем случае радиус обнаружения опасных явлений погоды близок к аналогичному радиусу некогерентного МРЛ-5 и составляет ~250 км. В режиме наблюдений *Скорость* ДМРЛ функционирует в радиусе ~100 км.

Несмотря на то что полный вектор скорости движения частиц облаков и осадков можно получить одновременно при работе трех или двух ДМРЛ, применение даже одного ДМРЛ заметно повышает объем и качество используемой радиолокационной инфор-

мации. В частности, представляется возможным восстанавливать поле ветра в обложных осадках, существенно повышать эффективность распознавания шквалов и микрошквалов, измерять сдвиг ветра, оценивать турбулентность в облаках и осадках, получать информацию о вертикальных движениях частиц и воздуха в облаках (в том числе в грозо-градовых облаках, где полеты весьма опасны и поэтому запрещены), гораздо надежнее определять смерчи и т. д. Все указанное позволяет повышать качество краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов ОЯ, связанных с облаками и осадками.

Введение в метеорологических радиолокаторах режима двойной поляризации значительно расширяет их возможности за счет получения принципиально новой информации о структуре наблюдаемого объекта. Из всех параметров, оценивание которых в дополнение к традиционно измеряемым возможно в поляриметрическом радиолокаторе, наиболее информативными признаны три:

- 1) дифференциальная отражаемость Z_{DR} ,
- 2) дифференциальная фаза K_{DP} ,
- 3) модуль коэффициента взаимной корреляции $|\rho_{HV}|$.

Практическая ценность поляризационных методов измерений в метеолокации состоит в уникальной возможности автоматического распознавания типа гидрометеоров, основанной на анализе совокупности оценок величин Z , Z_{DR} , K_{DP} , $|\rho_{HV}|$ и включающей:

- детектирование града с высокой точностью;
- детектирование торнадо;
- различение дождя и снега;

высокой точности измерения осадков, как летних, так и зимних; доказано, что для дальности менее 100 км применение поляризационных измерений позволяет уменьшить ошибку указанных измерений вдвое, что признано самым большим прорывом в измерении дождя за всю историю применения радаров в метеорологии.

Возможности поляриметрических радиолокационных станций продемонстрированы на рис. 2 и 3.

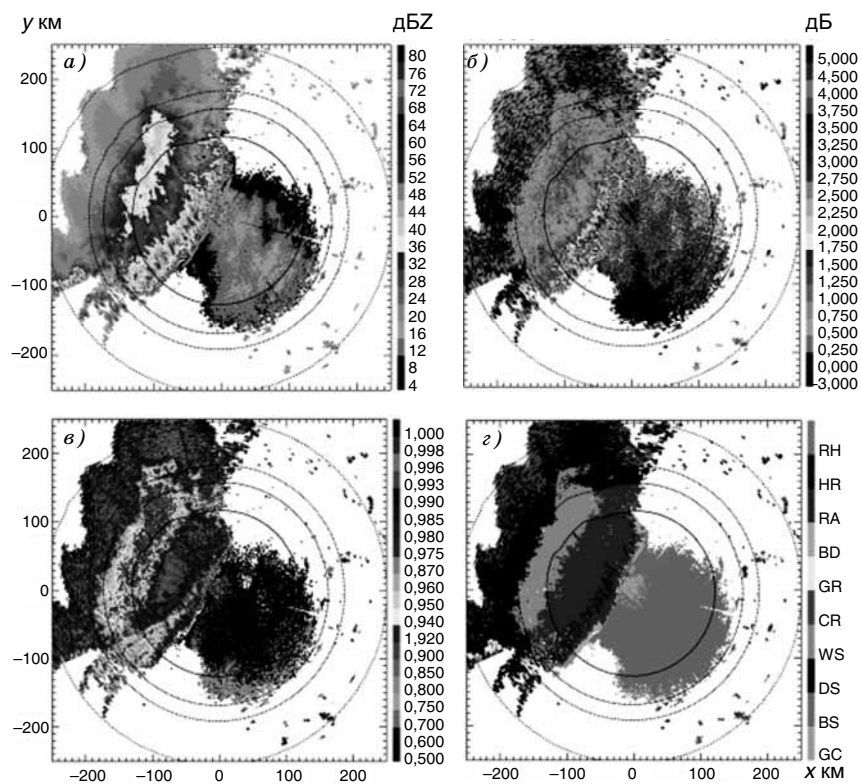


Рис. 2. Пример определения на индикаторе кругового обзора поляриметрического локатора зон сухого снега, мокрого снега, дождя, местников и биоотражателей.

a — отражаемость (дБZ), *б* — дифференциальная отражаемость (дБ), *в* — коэффициент кросс-корреляции, *з* — классификация.

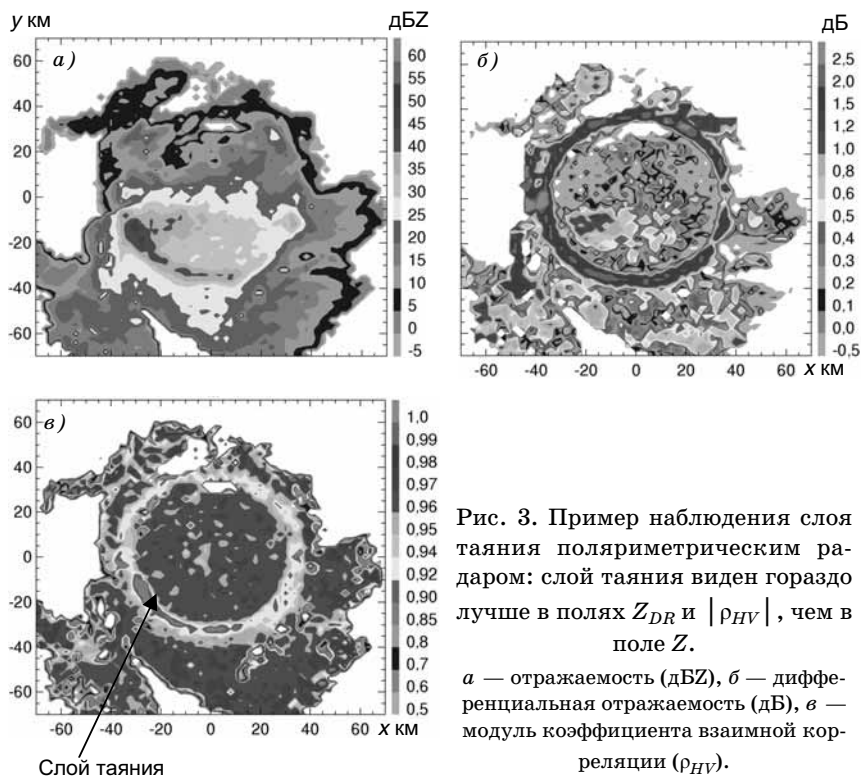


Рис. 3. Пример наблюдения слоя таяния поляриметрическим радаром: слой таяния виден гораздо лучше в полях Z_{DR} и $|\rho_{HV}|$, чем в поле Z .

a — отражаемость (дБZ), b — дифференциальная отражаемость (дБ), c — модуль коэффициента взаимной корреляции (ρ_{HV}).

Пассивная радиолокация (радиотеплолокация, СВЧ-радиометрия)

Пассивная радиолокация основана на приеме собственного радиотеплового излучения атмосферы посредством пассивных радиолокационных приемников.

В безоблачной атмосфере поглощение микроволнового излучения происходит в основном в кислороде и водяном паре. При этом линии поглощения в кислороде центрированы на $\lambda = 0,25$ см и $\lambda = 0,5$ см, линии поглощения в H_2O — на $\lambda = 0,163$ см и $\lambda = 1,35$ см, окна прозрачности — вблизи $\lambda = 0,8$ см и $\lambda = 0,3$ см, а также име-

ется область малого поглощения при $\lambda \geq 1,6$ см. Эти длины волн используются для определения вертикального профиля температуры воздуха (линия O_2 на $\lambda = 0,5$ см) и профиля влажности (линии H_2O на $\lambda = 1,35$ см и $\lambda = 0,163$ см).

Для изучения структуры характеристик влагосодержания атмосферы, облаков и осадков в период их развития и сверхкраткосрочного прогноза атмосферных фронтов находят применение СВЧ-радиометры (частоты 22,2 и 36,5 ГГц) совместно с радиолокатором МРЛ-5.

В настоящее время на сети Росгидромета находит применение метеорологический температурный профилемер МТП-5 (НИРФИ, ЦАО, АТТЕХ), работающий в линии поглощения кислорода $\lambda = 0,5$ см и определяющий профили до высоты 600 м с дискретностью 50—100 м и точностью измерений температуры 0,3—0,6 К. На рис. 4 представлен суточный ход температуры, полученной с помощью МТП-5.

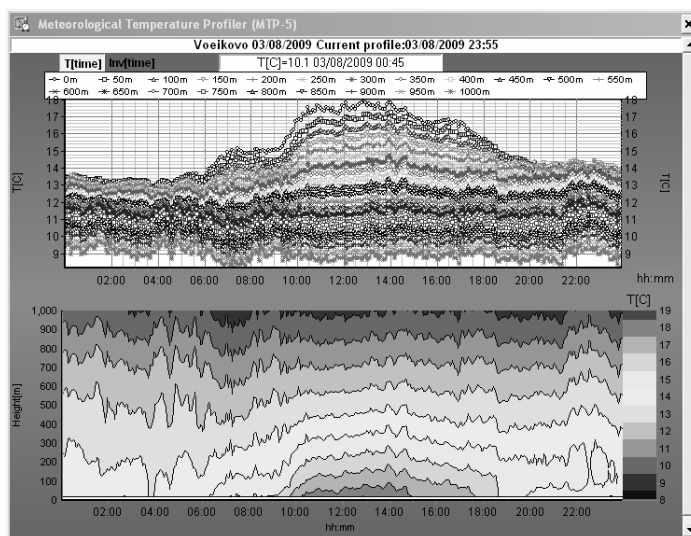


Рис. 4. Суточный ход температуры нижнего километрового слоя атмосферы 3 августа 2009 г. в п. Воейково по данным МТП-5.

Введение пассивного канала (СВЧ-радиометра) в МРЛ позволяет решать ряд задач метеорологического назначения, среди которых следует выделить определение водозапаса облаков и осадков, определение средней водности облаков в направлении визирования, оценку пространственного распределения мелкокапельной и крупнокапельной фракций водозапаса облачной системы, выявление переохлажденных зон облачных образований с целью предупреждения возможного обледенения самолетов и т. д.

В качестве примера на рис. 5 приведена пространственно-временная серия из трех последовательно полученных радиотеп-

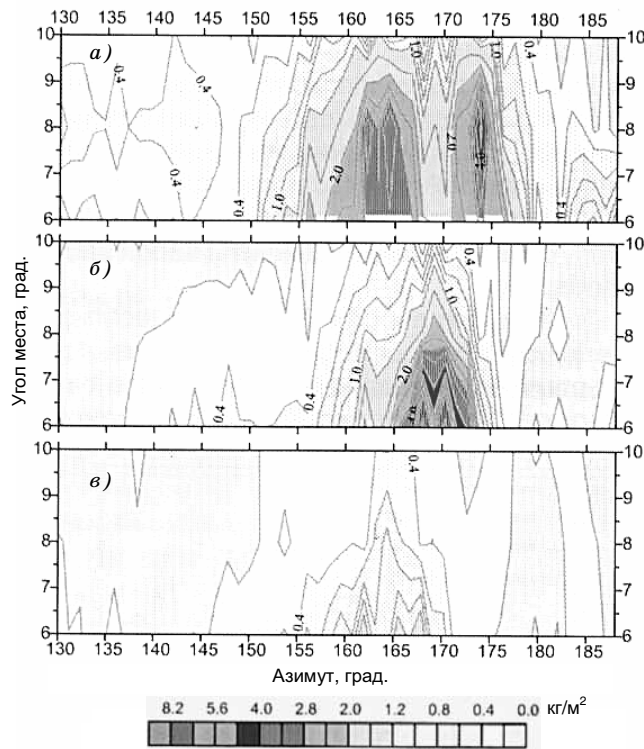


Рис. 5. Пространственно-временная эволюция водозапаса кучево-дождевого облака ($\text{кг}/\text{м}^2$).

a — 18 ч 41 мин 50 с, *б* — 18 ч 55 мин 37 с, *в* — 19 ч 08 мин 16 с.

локационных карт водозапаса кучево-дождевого облака (азимут $\varphi = 130...188^\circ$, угол места $\alpha = 6...11^\circ$), восстановленных по СВЧ-радиометрическим измерениям. Радиотеплолокационные данные отражают эволюцию водозапаса S_b за короткий интервал времени на стадии диссипации. На рис. 5 а (18 ч 41 мин) отчетливо выделяются две ячейки, водозапас которых составляет 6—10 кг/м². В 18 ч 55 мин (см. рис. 5 б) две ячейки трансформируются в одну ячейку с водозапасом около 8 кг/м². В 19 ч 08 мин (см. рис. 5 в) облако практически диссипировало, а его водозапас не превышает 0,5—2,0 кг/м².

Результаты экспериментальных исследований показывают перспективность дистанционного определения влаго- и водозапаса атмосферы и исследования их пространственно-временной изменчивости на основе применения методов пассивной и пассивно-активной радиолокации. Наиболее эффективны эти методы при изучении водозапаса и средней водности переохлажденных зон облаков, в которых возможно обледенение летательных аппаратов и которые представляют наибольший интерес для активных воздействий на них с целью вызывания осадков и регулирования электрической активности.

Применение данных ПАРЛС в задаче оценки степени обледенения летательных аппаратов

Для авиации одним из опаснейших метеоявлений, связанных с наличием в атмосфере переохлажденной воды, является обледенение летательных аппаратов (ЛА). В принятые критерии распознавания опасных метеообъектов входят различные метеопараметры атмосферы, в частности высота нижней границы и толщина слоя облаков, толщина слоя обледенения, средние значения температуры, относительной и удельной влажности в слое обледенения и ряд других. ПАРЛС позволяет определять местоположение зон обледенения в переохлажденных облаках, скорость и направление движения, горизонтальные и вертикальные размеры и площади этих зон, а также среднюю водность и, следовательно, интенсивность обледенения.

Активно-пассивные радиолокационные исследования грозоопасных облаков

В Ленинградской области на полевой экспериментальной базе в п. Тургош в 80—90-х годах были проведены исследования радиолокационных характеристик кучево-дождевых (грозовых) облаков и грозовых разрядов с помощью многоволнового активно-пассивного радиолокационного комплекса, включавшего, наряду с ПАРЛС, РЛС дециметрового и метрового диапазонов, которые надежно фиксируют грозовые разряды в облаках.

В качестве примера на рис. 6 приведены вертикальные профили отражаемости $Z(H)$ и водности $w(H)$ мощной конвективной ячейки, исследовавшейся 10 июля 1991 г. на протяжении 60 мин

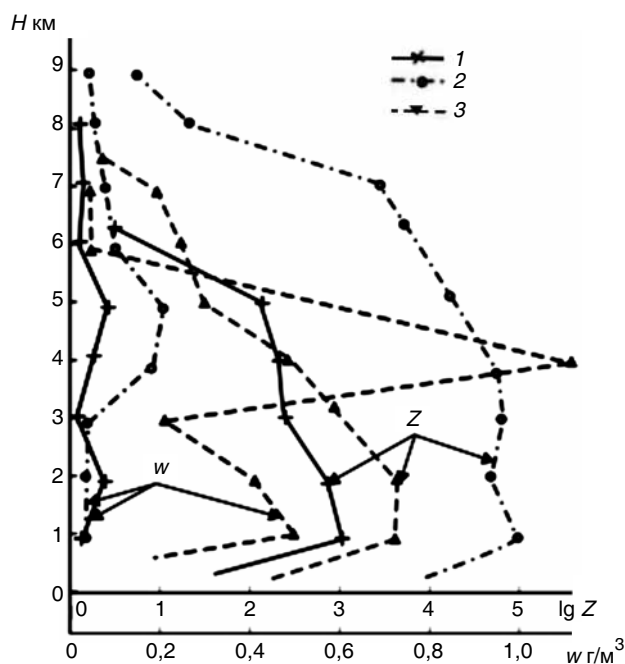


Рис. 6. Вертикальные профили $Z(H)$ и $w(H)$ в периоды роста (1), пика (2) и уменьшения (3) грозовой активности, полученные 10 июля 1991 г.

(40 мин продолжалась гроза). Профили $Z(H)$ и $w(H)$ соответствуют периодам роста, пика и уменьшения грозовой активности. Из рисунка видно, что профили $Z(H)$ и $w(H)$ за время грозы существенно различаются и максимумы их в пространстве и во времени не совпадают.

Приведенные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы:

пространственно-временное распределение водности мощного конвективного облака по данным СВЧ-радиометра не соответствует распределению его отражаемости;

максимумы грозовой активности и водности конвективной ячейки не совпадают во времени: пик грозовой активности имеет место часто при относительно малых значениях w ; эти экспериментальные данные указывают на то, что зоны интенсивной электризации, по-видимому, содержат ледяные облачные частицы.

Также выявлен ряд особенностей во взаимном расположении зон приземных осадков различной интенсивности и молний в Сб.

Анализ проведенных исследований расположения зон повышенных значений отражаемости, турбулентности и грозовой активности в конвективных облаках показал следующее (рис. 7):

зоны повышенной отражаемости и турбулентности в грозовом облаке в целом не совпадают; наиболее близкое их взаимное расположение, а местами и перекрытие наблюдаются в грозоактивной стадии;

молниевая активность наблюдалась вблизи зон повышенной турбулентности в передней части облака.

Эти и другие исследования Сб подтвердили перспективность применения в радиометеорологических исследованиях гроз РЛС дециметрового и метрового диапазонов, несомненную целесообразность отображения на мониторах МРЛ активности и турбулентности, особенно для фронтальных Ns, Сб.

Совместное применение МРЛ и грозопеленгаторов

Как показали результаты начатых еще в середине 60-х годов совместных наблюдений МРЛ и однопунктовыми грозопеленгаторами-дальномерами за конвективными облаками, грозопелен-

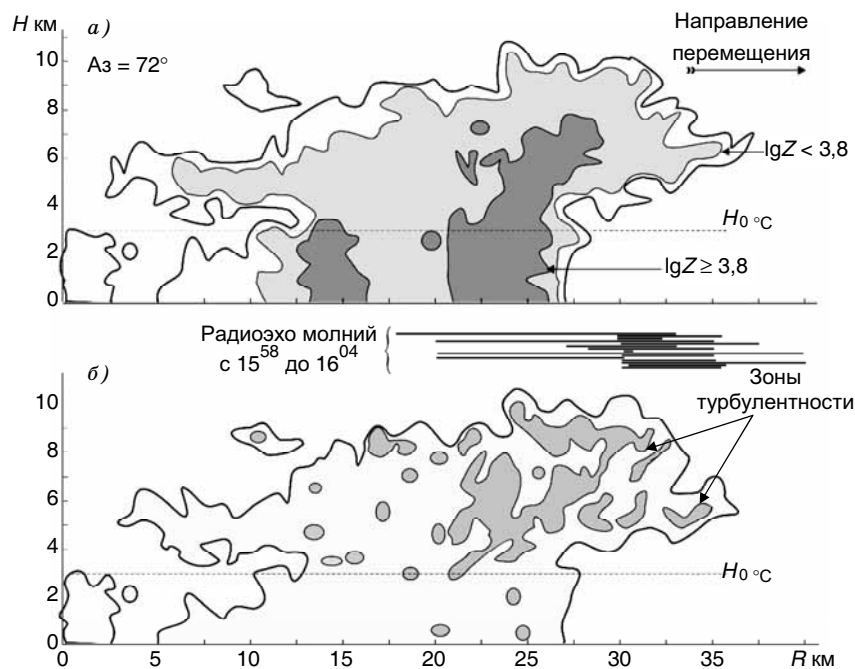


Рис. 7. Относительное расположение зон повышенной отражаемости (а) и турбулентности (б) грозового облака в начале периода молниевой активности (16 ч 00 мин 13 с 31 июля 1989 г.).

гаторы позволяют повысить вероятность распознавания гроз МРЛ на 10—15 %, доведя ее до 85—90 %.

В 2004 г. компания «Алвес» развернула грозопеленгационную сеть на Северо-Западе России. Это позволило провести совместную обработку данных наблюдений за конвективными облаками с помощью МРЛ-5, установленного на базе ГУ «ГГО» в п. Воейково Ленинградской области. В результате совместного эксперимента были подтверждены результаты опытов 60-х годов для однопунктовых грозопеленгаторов-дальномеров и показано, что применение высокоточных многопунктовых систем позволяет значительно повысить распознавание гроз МРЛ.

В зависимости от величины критерия грозовой опасности грозопеленгационная сеть позволяет исключить ложные тревоги

МРЛ в 24—76 % случаев, доведя вероятность распознавания гроз МРЛ до 95—100 %.

На рис. 8 приведен пример представления данных совместных наблюдений за конвективными облаками МРЛ и грозопеленгационной сетью «Алвес».

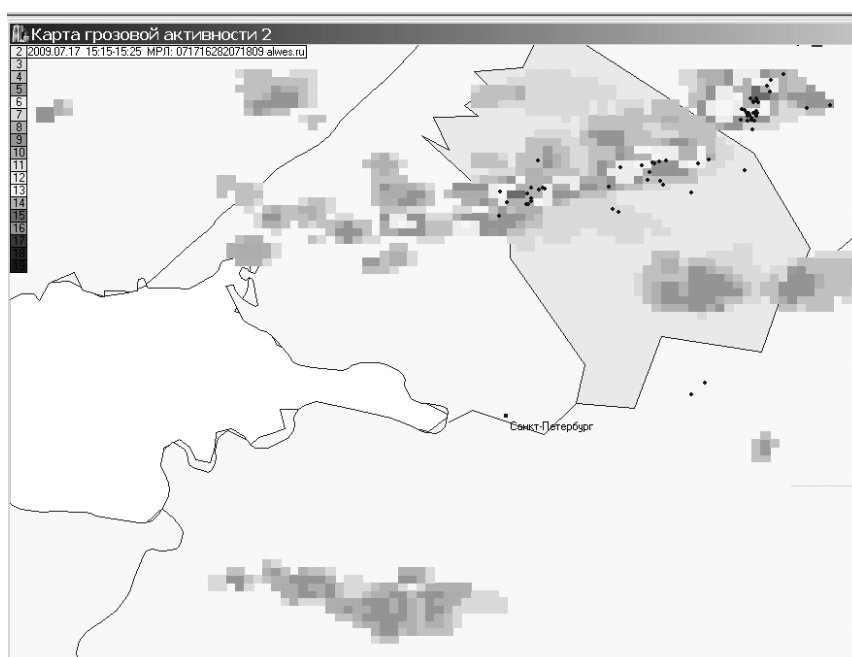


Рис. 8. Пример представления данных совместных наблюдений за конвективными облаками МРЛ и грозопеленгационной сетью «Алвес» с 15 ч 15 мин до 15 ч 25 мин 17 июля 2009 г.

Точками указано местоположение грозовых разрядов.

Для метеобеспечения аэродромов, пусков ракет и космических аппаратов, артиллерийских стрельб необходимы данные о характеристиках ветра как в нижнем приземном слое, до высоты 60 м, где возможен срыв ракеты, так и в верхних слоях, до высоты 20—25 км.

Для этого находят применение доплеровские радиолокаторы чаще всего непрерывного излучения в широком диапазоне длин волн.

Принцип работы ветровых профайлеров основан на отражении (рассеянии) радиоволн определенного диапазона частот от неоднородностей атмосферы (ветровых турбулентностей, восходящих и нисходящих потоков, слоев с разным изменением температуры и влажности, облаков, осадков) и измерении доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала. Полный вектор скорости ветра определяется путем совместной обработки сигналов, полученных от разнесенных в пространстве приемных пунктов.

Уровень отражения (рассеяния) радиоволн от чистой атмосферы весьма незначителен, поэтому ветровые профайлеры представляют собой достаточно сложные и дорогие приборы, построенные по самым современным технологиям.

Так, имеется отечественная экспериментальная разработка на $\lambda = 0,8$ см для получения скорости и направления ветра до высоты 1,5 км.

Имеется несколько модификаций зарубежных ветровых профайлеров, в том числе фирмы «Вайсала»: LAP-3000, LAP-8000, LAP-12000, LAP-16000, которые соответствуют высоте зондирования 3,0; 8,0; 12,0 и 16,0 км соответственно.

Диапазон частот: от $f = 915,1290$ МГц для LAP-3000 до $f = 50$ МГц для LAP-16000 (λ от 30 см до 6 м).

Диапазон размеров апертуры антенн: от $2,7 \text{ м}^2$ для LAP-3000 до 1550 м^2 для LAP-12000.

При метеобеспечении авиации важной является информация об орнитологической обстановке в аэродромной зоне полетов. Метеорадиолокаторы позволяют получать такую информацию в радиусе до 50 км.

Для метеобеспечения авиации совместно с МРЛ находят применение также оптические квантовые локаторы, поскольку с их помощью получают наиболее точную оперативную информацию о высоте нижней границы облаков $H_{\text{НГ}}$. Они позволили приблизиться к практической реализации возможностей измерения наклонной дальности видимости. Указанные параметры являют-

ся столь важными для обеспечения безопасности полетов, что входят в число нормативных, определяющих разрешение на взлет и посадку летательных аппаратов на аэродромах. Оптические квантовые локаторы благодаря их очень большому энергетическому потенциалу позволяют получать подробную картину топографии нижней поверхности облаков при любых метеоусловиях, особенно в ночное время радиусе 10—15 км ($P_{\text{цс}}$), в результате чего появляется возможность прогнозировать параметр $H_{\text{НГ}}$ с заблаговременностью 5—10 мин с высокой оправдываемостью.

В последнее время широко ведутся работы по созданию отечественных малогабаритных метеорологических радиолокаторов для решения локальных, тактических задач (экология городов, метеообеспечение небольших аэропортов, корабельной авиации, спортивных трасс, работы буровых установок в шельфовой зоне).

На рис. 9 представлен мобильный автоматизированный метеорологический радиолокатор «Контур-К» ($\lambda = 3,2$ см).



Рис. 9. Метеорологический радиолокатор (поворотная платформа и пульт управления и индикации).

Радиолокатор имеет следующие характеристики:
диаметр антенны 540/760 мм,
максимальная дальность обнаружения метеорологических целей до 200 км,
сектор обзора 360°.

Предусмотрена возможность передачи метеорологической информации потребителям по коммутируемым и выделенным линиям связи и через глобальную сеть Интернет. Количество потребителей информации не ограничено.

В настоящее время радиолокатор «Контур-К» успешно прошел государственные испытания в составе комплексной автоматизированной метеорологической системы «КАСМЕТЕО-К» и представлен на рассмотрение межведомственной комиссии для присвоения литеры «О1».

Подготовлен к полевым испытаниям передвижной доплеровский радиолокатор ($\lambda = 3,2$ см, диаметр антенны 1,5 м), предназначенный для обеспечения авиации (Завод «Энергия», ГУ «ГГО», ГУ «ВГИ»).

Ведутся работы по объединению радиолокационной метеорологической информации с данными ИСЗ и наземной метеорологической сети в интересах совершенствования прогноза погоды.

ГГО и ВГИ совместно с Санкт-Петербургским ЦГМС-Р разработали и внедрили в опытную эксплуатацию на территории Северо-Западного региона оперативную систему приема, обработки, архивации и представления на единой картографической основе разнородной метеорологической информации с различными пространственно-временными параметрами осреднения.

Подготовлен проект методики приема и формально-логического контроля информационных сообщений в коде BUFR, поступающих по каналам АСПД Росгидромета.

Подготовлен проект методики использования композитных радиолокационных карт погоды в оперативной практике подразделений Северо-Западного УГМС.

Заключение

Анализ всего изложенного показывает, что результаты современных теоретических исследований в области радиолокационной метеорологии, опытно-конструкторских разработок по созданию автоматизированной аппаратуры в виде активных и пассивных МРЛ, работающих в широком диапазоне длин радиоволн, метеорологических лидаров, грозопеленгаторов, созданных мето-

дик применения этих технических средств получения информации для штормоповещения об облаках естественного происхождения и связанных с ними опасных явлениях погоды, а также атмосферных образованиях антропогенного происхождения (аварии на АЭС, химических предприятиях и т. п.) в целом отвечают запросам различных ведомств и организаций. Кроме того, обеспечивается также получение традиционной метеорологической информации, используемой в гидрологических, океанологических целях, а также при АВ на облака, при запусках баллистических ракет и космических ЛА и т.д.

В перспективе следует рассчитывать на увеличение числа направлений применения радиометеорологической информации для решения многих задач в связи с появлением новых запросов. Конечно, развитие должно приводить к увеличению объема и повышению качества используемой информации с применением характеристик отражения, ослабления, излучения и параметров движения метеообразований, к увеличению оперативности получения и распространения информации и т.д.

Это позволит обеспечить усвоение большего числа характеристик радиометеорологических наблюдений в численных (региональных) моделях и усовершенствовать методы сверхкраткосрочного прогноза погоды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Д. (1967). Успехи радарной метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат. — 195 с.

Степаненко В. Д., Щукин Г. Г. (2001). Радиометеорологические исследования / Юбилейный сборник «Современные исследования Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова». Т. 2. — СПб.: Гидрометеоиздат, с. 163—183.

Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. (1987). Радиотеплолокация в метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат. — 283 с.

Щукин Г. Г., Булкин В. В. (2009). Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. — Муром: Изд-во «Полиграфический центр Муромского ин-та ВГУ». — 166 с.

УДК 551.576.2:551.583.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ
ВНУТРИМАССОВОЙ И ФРОНТАЛЬНОЙ СЛОИСТООБРАЗНОЙ
ОБЛАЧНОСТИ НАД СЕВЕРО-ЗАПАДНЫМ РЕГИОНОМ
РОССИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ АКТИВНЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЙ**

*А. П. Доронин¹, М. В. Белевич², В. Н. Козлов¹,
Е. Е. Кильчанский², Р. В. Шереметьев²*

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
e-mail: shchukin@main.mgo.rssi.ru

² Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского
197082 Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Поступила в редакцию 1.02.2010
Поступила после доработки 24.03.2010

Введение

Данные о фазовом состоянии конвективных и слоистообразных облаков имеют большое значение для активных воздействий (АВ) на облака с целью искусственного регулирования осадков, обледенения летательных аппаратов, молниевой активности. В последние годы в связи с расширением работ по метеозащите мегаполисов от выпадения обильных летних и зимних осадков потребность в таких сведениях возрастает.

Различие в методах и средствах АВ на облака и туманы обуславливает необходимость их подразделения на теплые (облака и туманы, наблюдаемые в атмосфере при температуре воздуха выше 0 °С) и переохлажденные (облака и туманы, наблюдаемые в атмосфере при температуре воздуха ниже 0 °С). В настоящее время наиболее проработанными и практически реализуемыми являются способы АВ на переохлажденные облака и туманы. В частности, в результате многочисленных натуральных экспериментов,

проведенных на экспериментальных метеорологических полигонах Центральной аэрологической обсерватории, Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института и др. во второй половине XX столетия, были получены критерии пригодности (см. табл. 1) переохлажденной слоистообразной облачности к АВ с целью искусственного вызывания осадков (изменения их интенсивности) и рассеяния облачного покрова (Активные воздействия, 1990).

Целью настоящей работы является анализ и обобщение полученных в результате самолетного зондирования атмосферы данных о фазовой структуре внутримассовых и фронтальных слоистообразных облаков Северо-Западного региона в различные сезоны года.

Исследования фазового состояния слоистообразных облаков

Сведения о фазовом состоянии облаков различных форм представлены в ряде фундаментальных справочников (Облака и облачная атмосфера, 1990 и др.) и монографий (Мейсон, 1961; Дубровина, 1982 и др.). В отдельных работах фазовое состояние облаков рассматривается для конкретных районов, например Украины (Леонов и др., 1967), Средней Азии (Джураев и др., 1977), Северо-Запада (Синькевич, 2001). Однако представленных в упомянутых публикациях данных недостаточно для планирования и проведения работ по активным воздействиям с целью искусственного регулирования осадков.

Вместе с тем, работ, содержащих сведения о фазовом состоянии слоистообразной облачности над северо-западными (Санкт-Петербург) и северными (Архангельск) районами России, практически нет. С целью восполнения данного пробела авторами выполнена обработка материалов самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м (7903 тысяч подъемов самолетов-зондировщиков) над Санкт-Петербургом и Архангельском за период 1953—1964 гг.

Данные для Санкт-Петербурга и Архангельска считались репрезентативными для северо-западного и северного районов в соответствии с результатами исследований пространственной изменчивости характеристик слоистообразной облачности (Сонеч-

кин и др., 1969; Хлебникова и др., 2009). Как показано в указанных работах, данные о характеристиках облачности могут быть распространены на значительные площади (сотни и тысячи км²) без существенных временных изменений. В таких пределах эффекты анизотропности и неоднородности структуры облачных полей, по крайней мере в первом приближении, могут не учитываться (Волкова, 1976). В этом смысле данные для одного пункта, над которым располагается центральная часть облачного массива, могут считаться репрезентативными и показательными для всего рассматриваемого района (Упорова, 1976).

При анализе материалов зондирования к внутримассовой слоистообразной облачности (BCO) были отнесены сплошные одно- и многослойные слоистые (St) и слоисто-кучевые (Sc) облака, наблюдающиеся как самостоятельно, так и в сочетании с высококучевыми (Ac) облаками.

При определении фронтальной слоистообразной облачности (FCO) рассматривались два класса облаков. К первому классу (слоисто-дождевые облака) относились слоисто-дождевые облака (Ns), наблюдающиеся как самостоятельно, так и в сочетании с другими формами, включая и высокослоистые (As).

Ко второму классу (высокослоистые облака) относились высокослоистые облака (As), наблюдающиеся как самостоятельно, так и в сочетании с другими формами, включая перисто-слоистые (Cs) и высококучевые (Ac).

Исследование характеристик BCO проводилось не отдельно по формам облачности, а по их совокупности, поскольку слоистые и слоисто-кучевые облака достаточно близки между собой как по внешнему виду, так и по условиям их образования. Облака этих форм в основном располагаются под слоями инверсии. Кроме того, они образуются в большинстве своем в пограничном слое (Матвеев, 1984).

Изучение характеристик FCO проводилось, как правило, отдельно для теплого (апрель—сентябрь) и холодного (октябрь—март) полугодий, а BCO — по месяцам, сезонам и полугодиям.

Привлечение материалов самолетного зондирования атмосферы для выполнения настоящей работы объясняется тем, что наи-

более надежные данные о характеристиках облаков различных форм (включая, разумеется, и данные об их фазовом состоянии) можно получить именно с их помощью.

При выполнении самолетного зондирования атмосферы два бортаэролога проводили визуальные и инструментальные наблюдения за высотой и характером нижней и верхней границы облачных слоев, микроструктурой (включая фазовое состояние) и водностью облаков, болтанкой и обледенением самолета, осадками, оптическими явлениями и т. д. Для измерения давления, температуры и влажности воздуха использовался самолетный метеорограф (Наставление, 1958).

Влияние фазового состояния облаков на способы активного воздействия на облака

При воздействии на облака реализуют, как правило, один из трех типов неустойчивости (Седунов, 1987):

неустойчивость фазового состояния водной субстанции,
коллоидальную неустойчивость дисперсной системы,
конвективную (вертикальную) неустойчивость атмосферы.

При воздействии на переохлажденные слоистообразные облака реализуют первый и второй типы неустойчивости, регулируя фазовое состояние облака для ускорения процесса седиментации облачных частиц. Впервые на возможность искусственного изменения фазового состояния переохлажденных облаков с помощью химических реагентов указали В. Шеффер и Б. Воннегат (Byers Nagase, 1974).

Рассмотрим критерии пригодности слоистообразной облачности для искусственного регулирования осадков, приведенные в табл. 1 (Половина, 1980).

Из таблицы видно, что одним из параметров, входящих в оба указанных критерия пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к АВ, является их фазовое состояние. Это обстоятельство указывает на необходимость получения данных о фазовом состоянии облачности в конкретных физико-географических районах России при осадкообразующем процессе в облаках, дающих осадки, и в облаках, не дающих осадки.

Таблица 1

Критерии пригодности слоистообразных облаков для активных воздействий

Цель модифицирования	Параметры критерия
Вызывание (интенсифицирование) осадков	Мощность облачного слоя не менее 250—300 м Фазовое состояние капельное, смешанное или кристаллическое Температура на верхней границе облаков не выше $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ для углекислоты, $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ для йодистого серебра Высота нижней границы не более 1000 м
Рассеяние облачного покрова	Мощность облачного слоя не более 1000 м Фазовое состояние капельное или смешанное Средняя температура облачного слоя не выше $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Известно, что в высоких и умеренных широтах значительные осадки выпадают в большинстве случаев из облаков со смешанной фазовой структурой (Кириухин, 1956). Это обстоятельство указывает на определяющую роль твердой фазы в образовании осадков в указанных широтах. Например, по данным работы Зака (1949), обложные осадки из смешанных облаков выпадают в 83 % случаев, тогда как из жидкокапельных — в 6 % случаев.

Вместе с тем, в естественных условиях даже при низкой температуре воздуха наблюдается нехватка или отсутствие кристаллов льда в облаках. Особенно низкая концентрация частиц твердой фазы в облаках отмечается при температуре выше $-10\text{...}-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Фингл, 1972). Так, по данным работы Гагина (1973), при температуре воздуха выше $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ концентрация ледяных кристаллов в облаках составляет около 10 м^{-3} . С понижением температуры концентрация кристаллов льда в облаках возрастает примерно в 10 раз на каждые $4\text{—}5\text{ }^{\circ}\text{C}$, достигая в облаках верхнего яруса $10\text{—}25\text{ л}^{-1}$ (Денис, 1983).

Для концентрации кристаллов льда в облаках характерна значительная изменчивость как во времени, так и в пространстве (Акимов и др., 1974б). При этом, наряду с горизонтальной неоднородностью концентрации кристаллов льда, имеет место также и

неравномерное распределение их по вертикали (Акимов и др., 1974а). Это обстоятельство является одним из главных факторов, обуславливающих возможность искусственного воздействия на переохлажденные облака (Модификация погоды и климата, 1967).

Однако наличие достаточной концентрации кристаллов льда в облаках является необходимым, но не единственным условием при воздействии. Для инициирования процесса образования осадков путем ввода в облака ледяных кристаллов необходимо существование условий, благоприятствующих росту этих твердых частиц (Наман, 1976). Анализ работы Леонова (1966) по этому вопросу позволил установить, что возможна реализация трех источников дополнительной влаги осадков: во-первых, уменьшение потерь влаги на испарение через верхнюю границу облака; во-вторых, парообразная влага, реализуемая за счет разности парциального давления насыщенного пара над льдом и водой, и, в-третьих, дополнительная влага за счет конденсации (сублимации) при усилении восходящих токов, которые могут быть вызваны выделением тепла фазовых переходов в зоне засева.

Для искусственного создания льдообразующих ядер в переохлажденных облаках в настоящее время существуют три основных метода. Первый из них заключается во введении в облака хладореагентов. Наиболее известными веществами этого класса являются твердая углекислота (CO_2) и жидкий азот (N_2), температура испарения которого составляет -156°C . При внесении в переохлажденные облака твердой углекислоты вокруг нее в результате резкого понижения температуры (до $-78\dots-93^\circ\text{C}$) создается зона глубокого пересыщения водяного пара. Вследствие этого вблизи ее поверхности не только происходит замерзание облачных капелек, но и создаются условия для спонтанного образования ледяных зародышей из комплексов молекул водяного пара (Никандров, 1959).

В основе второго метода лежит ввод в переохлажденные облака кристаллизующих веществ, способствующих образованию твердой фазы на их поверхности (Качурин, 1990).

Указанные вещества могут инициировать образование ледяной фазы в облаках в основном следующими путями (Баханова, 1978):

сублимационным — непосредственно из водяного пара путем поглощения его из окружающей влажной атмосферы;

иммерсионным — из переохлажденной воды путем кристаллизации облачных капель изнутри на подложках, являющихся ядрами кристаллизации;

контактным — из переохлажденной воды путем контакта с переохлажденными каплями.

По мнению А. Дениса (Денис, 1983), наиболее эффективной является контактная нуклеация, температурный порог которой составляет около $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ для твердой углекислоты (CO_2) и $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ для йодистого серебра (AgI).

В опытах по воздействию на переохлажденные облака из кристаллизующих реагентов на современном этапе наиболее широкое применение нашли такие вещества, как йодистое серебро, сернистая медь, флюороголюцин и др. (Плауде, Соловьев, 1979).

Третий метод предусматривает ввод в облака таких химических реагентов, как пропан, фреон-11, фреон-12 (Качурин, 1990). В этом случае активными центрами поглощения влаги становятся клатратные соединения реагента с водой — кристаллогидраты газов (Красновская и др., 1976).

Таким образом, рассмотренные методы искусственного образования ледяной фазы в облаках позволяют проводить целенаправленное воздействие на переохлажденные облачные системы с различными целями. При этом достигается переход облачности из коллоидно-устойчивого состояния в коллоидно-неустойчивое (вызывание осадков) и наоборот для изменения интенсивности осадков.

Характеристика фазовой структуры внутримассовых облаков

С учетом вышеизложенного на рис. 1 и 2 и в табл. 2 приведены данные, характеризующие фазовое состояние внутримассовой слоистообразной облачности над северо-западными и северными районами России. Анализ полученных данных свидетельствует о преобладании в течение года жидко-капельной фазы в ВСО. Так, повторяемость капельных внутримассовых

слоистых и слоисто-кучевых (St—Sc) облаков в холодное полугодие над северо-западными (Санкт-Петербург) и северными (Архангельск) районами составляет 86,4 и 64,5 %, в теплое полугодие — 96,5 и 92,4 % соответственно. Даже зимой эти облака чаще всего бывают капельными — 82,0 и 60,3 %. В переходные сезоны (весна и осень) повторяемость таких облаков повышается и составляет над северо-западными районами России 89,7 и 94,2 %, над северными районами — 68,0 и 80,4 % соответственно. Для всех рассматриваемых районов характерно увеличение повторяемости капельной фазы от зимы к лету, что вполне закономерно и объясняется повышением температуры воздуха в этот период. Из полученных результатов также следует, что ВСО могут быть не только капельными, но и смешанными, особенно в зимнее полугодие. Наибольшая повторяемость смешанной фазы в этих облаках наблюдается над северными районами России, где максимум ее приходится на период ноябрь—март (40,1—48,5 %). Над северо-западными районами России повторяемость смешанной фазы в ВСО, как правило, не превышает 20 %.

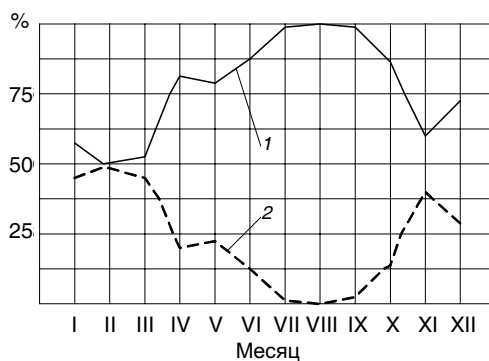


Рис. 1. Повторяемость (%) фазового состояния внутримассовых слоистообразных облаков над Архангельском.

1 — жидко-капельная фаза, 2 — смешанная фаза (кристаллическая фаза составляет менее 2 %).

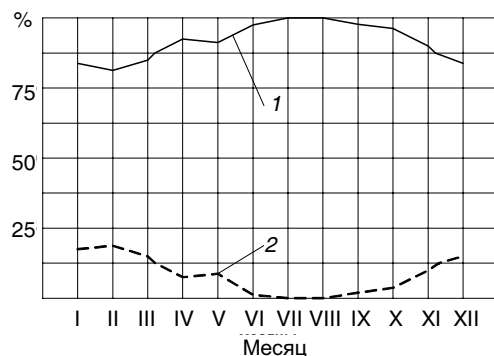


Рис. 2. Повторяемость (%) фазового состояния внутримассовых слоистообразных облаков над Санкт-Петербургом.

1 — жидко-капельная фаза, 2 — смешанная фаза (кристаллическая фаза составляет менее 2 %).

Таблица 2

Повторяемость (%) фазового состояния внутримассовых слоистообразных облаков

Фазовое состояние облаков	Пункт	Сезон				Полугодие	
		Зима	Весна	Лето	Осень	Холодное	Теплое
Капельное	Архангельск	60,3	68,0	92,6	80,4	64,5	92,4
	С.-Петербург	82,0	89,7	99,3	94,2	86,4	96,5
Смешанное	Архангельск	38,7	31,1	3,8	19,4	34,6	7,6
	С.-Петербург	17,4	9,9	0,7	5,8	13,2	3,5
Кристаллическое	Архангельск	1,0	0,9	—	0,2	0,9	—
	С.-Петербург	0,6	0,4	—	—	0,4	—
Число случаев	Архангельск	375	225	237	408	772	473
	С.-Петербург	533	273	150	484	1016	424

Полностью кристаллические облака St—Sc над рассматриваемыми районами встречаются крайне редко. Даже над северными районами России такие облака наблюдаются не чаще, чем в 2 % случаев.

Поскольку ВСО являются, как правило, однослойными (табл. 3) и чаще всего будут объектом АВ, представляется важным иметь сведения о фазовом состоянии именно таких облаков (Доронин и др., 2005). В связи с этим на рис. 3 и 4 и в табл. 3 приведены данные о фазовом состоянии однослойных ВСО над северо-западными и северными районами России.

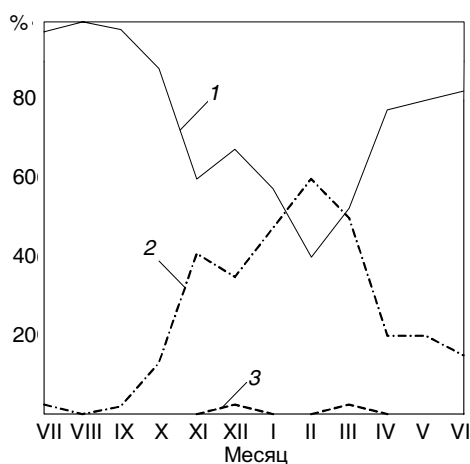


Рис. 3. Повторяемость (%) фазового состояния однослойных внутримассовых слоистообразных облаков над Архангельском. 1 — жидко-капельная фаза, 2 — смешанная фаза, 3 — кристаллическая фаза.

Рис. 4. Повторяемость (%) фазового состояния однослойных внутримассовых слоистообразных облаков над Санкт-Петербургом. 1 — жидко-капельная фаза, 2 — смешанная фаза, 3 — кристаллическая фаза.

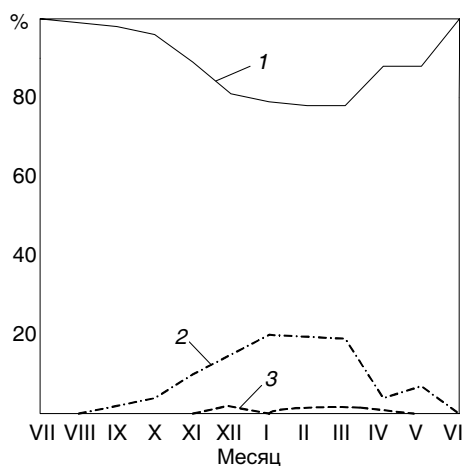


Таблица 3

**Повторяемость (%) одно- и многослойной внутримассовой
слоистообразной облачности**

Сезон	Пункт	Число облачных слоев				Число подъемов самолетов- зондировщиков
		Один	Два	Три	Четыре	
Зима	Архангельск	85,7	13,5	0,4	0,4	281
	С.-Петербург	88,6	11,2	0,2	—	437
Весна	Архангельск	88,5	10,3	1,2	—	165
	С.-Петербург	88,2	11,8	—	—	203
Лето	Архангельск	86,7	12,0	1,3	—	158
	С.-Петербург	88,1	11,9	—	—	101
Осень	Архангельск	88,0	11,3	0,7	—	300
	С.-Петербург	89,0	10,4	0,3	0,3	373

Таблица 4

**Повторяемость (%) однослойной ВСО с различной фазовой структурой —
капельной, смешанной, кристаллической**

Фаза	Зима	Весна	Лето	Осень	Холодное полугодие	Теплое по- лугодие
	<i>Архангельск</i>					
Капельная	55,3	65,1	94,2	79,9	62,2	90,9
Смешанная	43,9	33,6	5,8	20,1	37,0	9,1
Кристаллическая	0,8	1,3	—	—	0,8	—
Число зондирований	244	149	139	264	521	275
	<i>Санкт-Петербург</i>					
Капельная	79,0	85,7	100	92,5	83,3	96,2
Смешанная	19,7	12,7	—	7,5	15,8	3,4
Кристаллическая	1,3	1,6	—	—	0,9	0,4
Число зондирований	390	189	96	334	743	266

Анализ полученных данных свидетельствует о преобладании в однослойных облаках St—Sc, как и в случае многослойной ВСО, в течение года жидко-капельной фазы. Так, повторяемость

капельной фазы в таких облаках над северо-западными районами России превышает 80 %, а над северными районами — 60 %.

Можно также видеть, что однослойные ВСО могут быть не только капельными, но и смешанными, особенно в холодное полугодие. Наибольшая повторяемость смешанной фазы в однослойных ВСО наблюдается над Архангельском, составляя в ноябре 41,1 %, в марте 45,9 %, в январе 46,0 % и в феврале 60,7 %. В целом же в холодное полугодие эти облака имеют смешанное фазовое строение почти в 40 % случаев.

Значительная повторяемость смешанной фазы в однослойных облаках St—Sc над северными районами России объясняется наличием в этих районах более низких отрицательных температур в холодное полугодие по сравнению с другими пунктами. Это обстоятельство указывает на зависимость фазового состояния облаков от температуры, проявляющуюся в том, что понижение последней увеличивает вероятность появления кристаллов льда. Так, согласно работе Hobbs (1976), с понижением температуры концентрация кристаллов возрастает примерно в 10 раз на каждые 4°C, причем это изменение концентрации подчинено экспоненциальному закону. Над северо-западными районами России повторяемость смешанной фазы в однослойных ВСО значительно ниже и, как правило, даже зимой не превышает 20 %.

Полностью кристаллические однослойные облака St—Sc над рассматриваемыми районами наблюдаются довольно редко. Даже над районами Архангельска такие облака встречаются не чаще, чем в 1,0 % случаев.

Преобладание жидко-капельной фазы в ВСО является благоприятным фактором с точки зрения АВ на облака, но только в том случае, если они являются переохлажденными. В силу этого необходимы сведения о повторяемости переохлажденных облаков St—Sc над рассматриваемыми районами. Анализ таких данных, приведенных в работе Доронина (1993), показывает, что над выбранными районами облака этих форм в среднем за год в большинстве случаев являются переохлажденными (свыше 70 %). Наибольшая повторяемость переохлажденной ВСО приходится на зиму и составляет в зависимости от района 95—100 %. В переходные сезоны года повторяемость переохлажденных облаков

St—Sc также достаточно высока, особенно весной (83,0—95,0 % в зависимости от района).

Данные о преобладающей повторяемости переохлажденной ВСО над рассматриваемыми районами имеют большое практическое значение. Эта значимость обусловлена тем, что на современном этапе наиболее разработанными и практически внедренными являются методы и средства АВ именно на переохлажденные облака. При этом АВ на ВСО (главным образом, в холодное полугодие) в силу преобладающего капельного строения возможно как с помощью льдообразующих реагентов, так и посредством хладо-реагентов и других веществ.

Характеристика фазовой структуры фронтальных облаков

В настоящей работе получены и в табл. 5 и 6 приведены данные о повторяемости фаз воды в облаках, наблюдаемых в зонах фронтов с осадками (числитель) и без осадков (знаменатель), подтверждающие результаты ранее проведенных исследований для центрального региона (Зак, 1949). Анализ данных самолетного зондирования атмосферы позволил выделить девять типов фазового состояния фронтальных облаков (см. табл. 5 и 6): три основных (капельная, кристаллическая и смешанная) и шесть (выделены впервые) дополнительных. До определенной высоты (H) наблюдаются капельная, кристаллическая или смешанная фазы, затем происходит переход в другую фазу. В таблицах приведены данные для следующих типов фазового состояния фронтальных облаков: первый тип (I) — капельная фаза, второй (II) — капельная, смешанная; третий (III) — капельная, кристаллическая; четвертый (IV) — смешанная; пятый (V) — смешанная, капельная; шестой (VI) — смешанная, кристаллическая; седьмой (VII) — кристаллическая; восьмой (VIII) — кристаллическая, смешанная; девятый (IX) — капельная, смешанная, кристаллическая. В течение года разорвано-дождевые (Frnb), слоистые и слоисто-кучевые облака, связанные с фронтами, в большинстве случаев являются капельными. Смешанная фаза в облаках этих форм над рассматриваемыми районами наблюдается довольно редко, повторяемость этой фазы в течение года не превышает 10 %. Кристаллическая фаза в таких облаках отмечается в единичных случаях.

В слоисто-кучевых облаках капельная фаза, как правило, отмечается чаще на фронтах без осадков. Сравнение микроструктуры облачности, проведенное в разные периоды времени, показывает, что фазовое состояние облачности остается практически неизменным.

Весьма велика повторяемость смешанной фазы в слоисто-кучевых облаках на фронтах с осадками и без осадков над северными районами России. В этих районах она составляет 62,5 % в первом случае и снижается до 40 % во втором. Столь значительная повторяемость смешанной фазы может быть, по-видимому, объяснена попаданием в эти облака кристаллов льда из вышележащих слоев облачности. В целом, с точки зрения фазового состояния разорвано-дождевые, слоистые и слоисто-кучевые облака почти всегда пригодны к воздействию. Располагаясь, как правило, под пригодным к засеvu слоем облаков они могут служить дополнительным источником влаги из них.

В высококучевых облаках (Ac) капельная фаза преобладает, главным образом, на фронтах без осадков. Так, повторяемость капельных Ac облаков над северо-западными районами России в холодное полугодие составляет 90,5 %, в теплое — 79,2 %. Над северными районами России значения повторяемости капельных Ac в холодное и теплое полугодия составляют 40,0 и 64,2 % соответственно. В холодное полугодие над северными районами России смешанная фаза в Ac чаще всего наблюдается на фронтах с осадками (71,7 %). Кристаллическая фаза в высококучевых облаках отмечается нечасто. Даже в северных районах России на фронтах с осадками ее повторяемость не превышает 14 %.

Реже всего жидко-капельными бывают высокослоистые облака. Для таких облаков, наблюдающихся как на фронтах с осадками, так и на фронтах без осадков, повторяемость капельной фазы над рассматриваемыми районами не превышает 30 %.

В облаках As в течение года чаще по сравнению с облаками других форм отмечается наличие кристаллической фазы, причем в холодное полугодие чаще, чем в теплое. На фронтах без осадков кристаллические облака As отмечаются чаще, чем на фронтах с осадками. Так, в случае не дающих осадков фронтов кристаллические

Таблица 5

Повторяемость (%) фазового состояния фронтальных слонстообразных облаков (Архангельск)

Тип ФСОБЛ	Фазовое состояние облаков (ФСОБЛ)	Холодное полугодие						Теплое полугодие					
		Ns, Ns-As	As	Ac	Sc	St	Frnb	Ns, Ns-As	As	Ac	Sc	St	Frnb
I	Капельное	18,5 43,6	3,1 4,8	15,1 40,0	37,5 58,3	88,2 89,8	88,1 94,6	40,0 68,7	27,0 15,1	62,5 64,2	75,0 93,0	100,0 100,0	100,0 100,0
II	Капельное до H, выше смешанное	6,7 5,0	0,9 1,1	—	— 1,7	— 5,1	—	27,0 9,8	8,1 4,0	—	—	—	—
III	Капельное до H, выше кристал- лическое	—	—	—	—	—	—	0,7	2,7	—	—	—	—
IV	Смешанное	61,0 44,0	63,9 62,4	71,7 40,0	62,5 40,0	11,8 5,1	11,9 5,1	21,7 16,1	48,7 56,6	30,0 34,3	25,0 6,7	—	—
V	Смешанное до H, выше ка- пельное	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VI	Смешанное до H, выше кри- сталлическое	8,0 2,2	4,8 4,2	—	—	—	—	2,0 2,7	2,7 5,6	—	—	—	—
VII	Кристалличе- ское	4,7 5,0	26,9 27,5	13,2 12,0	—	—	—	2,0 2,7	5,4 17,7	7,5 1,5	—	—	—

VIII	Кристаллическое до H , выше смешанное	<u>1,1</u> —	<u>0,4</u> —	—	—	—	—	—	<u>5,4</u> <u>1,0</u>	—	—	—
IX	Капельное до H , выше до H_1 смешанное, выше кристаллическое	<u>1,1</u> —	<u>0,4</u> —	—	—	—	—	—	<u>5,4</u> <u>1,0</u>	—	—	—
		<u>464</u> <u>179</u>	<u>227</u> <u>189</u>	<u>53</u> <u>50</u>	<u>24</u> <u>60</u>	<u>17</u> <u>39</u>	<u>42</u> <u>39</u>	<u>152</u> <u>112</u>	<u>37</u> <u>198</u>	<u>40</u> <u>67</u>	<u>4</u> <u>45</u>	<u>6</u> <u>8</u>
Число случаев												

Таблица 6
Повторяемость (%) фазового состояния фронтальных слоистообразных облаков (Санкт-Петербург)

Тип ФСОБЛ	Фазовое состояние облаков (ФСОБЛ)	Холодное полугодие						Теплое полугодие					
		Ns Ns-As	As	Ac	Sc	St	Frb	Ns, Ns-As	As	Ac	Sc	St	Frb
I	Капельное	31,9	27,4	75,8	=	86,0	100,0	51,2	29,4	70,0	=	88,2	100,0
		45,7	15,0	90,5	89,5	97,9	100,0	48,8	25,1	79,2	98,0	100,0	100,0
II	Капельное до H, выше смешанное	3,3	=	-	-	-	-	14,3	4,3	-	-	-	-
		1,2	0,3	-	-	-	-	14,6	3,9	-	-	-	-
III	Капельное до H, выше кристал- лическое	6,2	2,1	-	-	-	-	6,4	2,2	-	-	-	-
		8,6	0,9	-	-	-	-	4,9	1,5	-	-	-	-
IV	Смешанное	24,2	31,1	24,2	=	12,0	-	9,8	39,1	30,0	=	11,8	-
		12,4	28,5	9,5	9,6	2,1	-	9,8	30,0	18,8	2,0	-	-
V	Смешанное до H, выше ка- пельное	1,1	=	-	-	-	-	2,0	-	-	-	-	-
		-	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VI	Смешанное до H, выше кри- сталлическое	14,0	1,0	-	-	-	-	6,9	2,2	-	-	-	-
		13,6	2,1	-	-	-	-	7,3	2,9	-	-	-	-
VII	Кристалличе- ское	14,9	38,4	-	=	2,0	-	2,5	20,6	=	-	-	-
		13,6	48,9	-	0,9	-	-	14,6	32,8	2,0	-	-	-

облака As в холодное полугодие в зависимости от района наблюдаются в 27,5—48,9 % случаев, в теплое — в 17,7—32,8 % случаев.

Гораздо более сложное фазовое строение имеют высокостроистые (As) и слоисто-дождевые (Ns) облака. Выделено девять разновидностей их фазового состояния. Наибольшую повторяемость из них имеют капельная, смешанная и кристаллическая фазы. Однако для проведения АВ на облака, и в частности выбора высоты засева реагентами, чрезвычайно важно знать распределение фаз воды по высоте. В отношении смешанной фазы в облаках в общем случае можно отметить следующее. Если типы II, III, IV, V, VI, VIII, IX (см. табл. 5—6) фазовой структуры рассматривать как смешанную фазу, то наибольшая повторяемость ее в холодное полугодие на фронтах с осадками характерна для слоисто-дождевой и высокостроистой облачности. Так, повторяемость смешанной фазы в Ns (Ns—As) и As над рассматриваемыми районами изменяется в холодное полугодие в пределах 53,2—78,0 и 34,2—53,2 %, а в теплое полугодие — в пределах 46,3—64,6 и 50,0—73,0 % соответственно.

На фронтах без осадков повторяемость смешанной фазы в слоисто-дождевых и высокостроистых облаках также достаточно высока. Например, в холодное полугодие повторяемость этой фазы в облаках Ns (Ns—As) составляет в зависимости от рассматриваемого района 40,7—51,2 %, в облаках As— 36,1—67,5 %, а в теплое — в 28,6—46,6 и 42,1—68,2 % соответственно.

Из представленных в табл. 5 и 6 данных видно, что на фронтах без осадков в течение года повторяемость жидко-капельной фазы в слоисто-дождевых облаках весьма значительна (43,6—45,7 % в холодное полугодие и 48,8—68,7 % в теплое в зависимости от рассматриваемого района). Большую повторяемость жидко-капельных слоисто-дождевых облаков на фронтах без осадков можно объяснить тем, что в эту группу облаков включены, по-видимому, также и облака St—Sc (Половина, 1971).

Таким образом, исследовав фазовое состояние внутримассовых и фронтальных слоистообразных облаков, можно сделать вывод о том, что наиболее сложное фазовое строение имеют облачные слои As и, особенно, мощные системы Ns и Ns—As.

Выводы

Для внутримассовой слоистообразной облачности над северо-западными (Санкт-Петербург) и северными (Архангельск) районами России характерно преобладание жидко-капельной фазы в течение года. Повторяемость капельных ВСО в холодное полугодие над северо-западными районами составляет 86,4 %, над северными районами — 64,5 %, в теплое полугодие — 96,5 и 92,4 % соответственно. Повторяемость смешанной фазы в ВСО над северо-западными районами не превышает 20 %, над северными районами за период ноябрь—март составляет 40,1—48,5 %. Полностью кристаллические ВСО над рассматриваемыми районами наблюдаются крайне редко — не более 1,0 % случаев.

В зонах фронтов с осадками и без осадков в течение года разорвано-дождевые (Fgnb), слоистые и слоисто-кучевые облака, связанные с фронтом, в большинстве случаев являются капельными. Смешанная фаза в этих облаках наблюдается довольно редко (повторяемость ее не превышает 10 % в год), кристаллическая фаза — в единичных случаях.

В слоисто-кучевых облаках капельная фаза отмечается чаще на фронтах без осадков: над северо-западными районами повторяемость ее в холодное полугодие составляет 89,5 %, в теплое — 98,0 %, над северными районами — 58,3 и 93,0 % соответственно. На фронтах с осадками повторяемость капельной влаги в слоисто-кучевых облаках над северными районами составляет в холодное полугодие 37,5 %, в теплое 75,0 %.

В высококучевых облаках капельная фаза преобладает на фронтах без осадков. Над северо-западными районами в холодное полугодие повторяемость капельных облаков составляет 90,5 %, в теплое — 79,2 %, над северными районами — 40,0 и 64,2 % соответственно. Смешанная фаза в облаках As чаще всего наблюдается на фронтах с осадками (71,7 %), повторяемость кристаллической фазы не превышает 14 %.

Повторяемость капельных высокослоистых облаков в северо-западных районах не превышает 30 %, в северных районах составляет не более 5 %. Смешанная фаза в As наблюдается примерно в 30 % случаев в северо-западных районах и в 62—64 % случаев в северных районах. Как правило, фронтальные As бывают кри-

сталлическими, повторяемость их в северо-западных районах колеблется в пределах 38—49 %, в северных составляет около 27 %.

Система Ns—As имеет разную фазовую структуру на фронтах с осадками и без осадков. Чаще всего фронтальные Ns—As бывают капельными. Так, в северо-западных районах в холодное полугодие капельные облака наблюдаются на фронтах с осадками и без осадков в 32 и 46 % случаев, в теплое — в 51 и 49 % случаев соответственно. Смешанные облака Ns—As наблюдаются реже: в холодное полугодие в 24 и 12 % случаев и в теплое полугодие в 39 и 30 % случаев соответственно. Чисто кристаллические облака наблюдаются в пределах 14 % случаев в холодное полугодие и в 20—33 % случаев в теплое. Остальные случаи приходятся на другие типы фазового состояния облаков (см. классификацию в табл. 5 и 6), причем наибольшее число случаев (14 %) приходится на сочетание фаз: смешанная до некоторой высоты H , затем кристаллическая.

В северных районах наблюдается несколько иное распределение фаз. Капельные системы Ns—As на фронтах с осадками и без осадков в холодное полугодие отмечаются в 18,5 и 43,6 % случаев, в теплое — в 40,0 и 68,7 % случаев соответственно. Смешанные облака в холодное полугодие наблюдаются в 61 и 44,0 % случаев, в теплое — в 21,7 и в 16,1 % случаев. Повторяемость кристаллических облаков в холодное полугодие составляет около 5 %, в теплое полугодие — 2—3 %. Остальные случаи приходятся на совокупность разных фаз, из них наибольшее значение в холодное полугодие имеют смешанная фаза и выше кристаллическая (8,0 и 2,2 % соответственно), а в теплое — капельная и выше смешанная (27,0 и 9,8 % соответственно).

Полученные данные о распределении фаз в облаках в холодное и теплое полугодие могут использоваться для выбора реагентов и высоты засева облаков при искусственном регулировании осадков в течение всего года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акимов Н.М., Прихотько Н.А. (1974а). О вертикальном распределении ледяных кристаллов. — Труды Укр. НИГМИ, вып. 125, с. 88—96.

Акимов Н.М., Волков А.Д., Лесков Б.Н. (1974б). Концентрация кристаллов в Ns. — Труды Укр. НИГМИ, вып. 133, с. 102—109.

Активные воздействия на гидрометеорологические процессы (1990) / Труды Всесоюзной конференции. — Л.: Гидрометеиздат. — 609 с.

Баханова Р.А. (1978). О механизме образования ледяных кристаллов на кристаллизующих реагентах / Обзор ВНИИГМИ—МЦД. — Обнинск. — 30 с.

Бекряев В.И., Довгалак Ю.А., Зинченко А.В. (1979). Применение струйной модели для расчета облачной конвекции в тропиках. — Труды ГГО, вып. 389, с. 32—39.

Волкова В.И. (1976). Вероятность сохранения состояний облачности через различные интервалы времени над отдельными районами Советского Союза. — Труды ВНИИГМИ—МЦД, вып. 49, с. 20—24.

Гагин А. (1973). Роль твердых элементов осадков при естественном и искусственном образовании дождя над Израилем. — В кн.: Международная конференция по активному воздействию на метеорологические процессы. — М.: Гидрометеиздат, с. 29—30.

Денис А. (1983). Изменение погоды засевом облаков. — М.: Мир. — 240 с.

Джураев А.Д., Курбаткин В.П., Ушинцев В.Ф. (1977). Облачные ресурсы и возможности увеличения осадков в Средней Азии. — Труды САРНИГМИ, вып. 46 (27). — 55 с.

Доронин А.П. (1993). Повторяемость переохлажденных слоистых, слоисто-кучевых облаков над районами России, Белоруссии и Прибалтики / Тезисы докладов научно-технической конференции «Проблемы военной геофизики и контроля состояния природной среды», 15—16 декабря 1992 г. — СПб.: ВИККА, с. 92.

Доронин А.П., Парнышков Н.Д., Авдюков В.М. (2005). Расслоенность внутримассовых слоистообразных облаков над разными районами России применительно к решению прикладных задач. — В сб.: Материалы XVII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. Часть 2. — Казань, с. 188—191.

Дубровина Л.С. (1982). Облака и осадки по данным самолетного зондирования — Л.: Гидрометеиздат. — 216 с.

Зак Е.Г. (1949). Микроструктура фронтальных облаков. — Метеорология и гидрология, № 6, с. 24—33.

Качурин Л.Г. (1990). Физические основы воздействия на атмосферные процессы / Учебник для ВУЗов. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Л.: Гидрометеиздат. — 463 с.

Кирюхин Б.В. (1956). К оценке роли твердой фазы в образовании атмосферных осадков // Ученые записки ЛГУ, сер. геофиз. наук, вып. 9, № 10, с. 9—19.

Красновская А.И., Шевалдина Г.И., Хижняк А.Н. (1976). Лабораторные исследования механизма взаимодействия реагентов типа пропана с водным аэрозолем. — Труды ЦАО, вып. 104, с. 108—116.

Леонов М.П. (1966). К вопросу об источниках влаги искусственных осадков при воздействии на облака. — Труды Укр. НИГМИ, вып. 53, с. 117—124.

Леонов М.П., Перелет Г.И. (1967). Активные воздействия на облака в холодное полугодие. — Л.: Гидрометеиздат. — 152 с.

Матвеев Л.Т. (1984). Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. — 751 с.

Мейсон Б.Дж. (1961). Физика облаков / Пер. с англ. — Л.: Гидрометеиздат. — 542 с.

Модификации погоды и климата (1967). Проблемы и перспективы / Пер. с англ. — Л.: Гидрометеиздат. — 100 с.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, 1958. Вып. 4. Ч. IV. — М.: Гидрометеиздат. — 152 с.

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

Облака и облачная атмосфера. Справочник (1990). — Л.: Гидрометеиздат. — 647 с.

Пирнач А.М. (1979). Исследование влияния агрегации ледяных частиц на процесс осадкообразования в смешанных слоистообразных облаках. — Труды УкрНИГМИ, вып. 170, с. 32—43.

Плауде Н.О., Соловьев А.Д. (1979). Льдообразующие аэрозоли для воздействия на облака / Обзор ВНИИГМИ—МЦД. — Обнинск. — 82 с.

Половина И.П. (1971). Воздействия на внутримассовые облака слоистых форм. — Л.: Гидрометеиздат. — 215 с.

Половина И.П. (1980). Рассеяние переохлажденных слоистообразных облаков и туманов. — Л.: Гидрометеиздат. — 213 с.

Седунов Ю.С. (1977). Воздействие на гидрометеорологические процессы. — В сб.: Проблемы современной гидрометеорологии. — Л.: Гидрометеиздат, с. 313—343.

Седунов Ю.С. (1987). Физика облаков и развитие работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. — В сб.: Достижения в области гидрометеорологии и контроля природной среды. — Л.: Гидрометеиздат, с. 34—56.

Сонечкин Д.М., Хандурова И.С. (1969). Результаты исследования пространственной изменчивости облачности над Европейской частью СССР. — Труды Гидрометцентра, вып. 50, с. 37—46.

Упорова Л.П. (1976). Непрерывная продолжительность общей облачности над территорией СССР. — Труды Гидрометцентра, вып. 25, с.91—96.

Флигл Р. (1972). Принципы и современное состояние проблемы искусственного воздействия на погоду. — В кн.: Изменение погоды человеком / Пер. с англ. — М.: Прогресс, с. 15—33.

Хлебникова Е.И., Салль И.А. (2009). Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России. — *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 5—13.

Byers Harace K. (1974). History of weather modification. — *Wea. and Climate modif.* — NY, p. 3—44.

Haman H.E. (1976). Physical problems of weather modification. — *Hydrol. Sci. Bull.*, V. 21, No. 4, 12, p. 587—602.

Hobbs Peter V. (1976). The concentration of ice particles in orographic clouds and cyclonic storms over the cascade mountains. — *J. Atm. Sci.*, V. 33, No. 7, p. 136.

УДК 551.508.95; 551.510.41

**ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ**

В. И. Привалов, Н. Н. Парамонова

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
e-mail: reshal@peterlink.ru

Поступила в редакцию 1.02.2010
Поступила после доработки 10.03.2010

Введение

Водород является парниковым газом непрямого действия. Взаимодействуя с радикалом ОН, он снижает окислительную способность атмосферы, что ведет к увеличению времени жизни в атмосфере парниковых газов, в частности метана. Увеличение содержания молекулярного водорода влияет на содержание водяного пара в стратосфере, что также сказывается на радиационном балансе атмосферы. Контроль содержания водорода в атмосфере особенно важен в связи с перспективой перехода энергетики на альтернативные виды топлива и уже осуществляется в целом ряде стран (Novelli et al., 1999).

Традиционным методом измерения концентрации водорода в атмосфере является газовая хроматография с использованием детектора на основе оксида ртути (Retrieve Gas Analyzers). Недостатком этих детекторов является малый диапазон линейности и несимметричность детектируемых пиков (Hammer, 2008). Следует отметить, что последние версии таких детекторов имеют улучшенный диапазон линейности (Lallo et al., 2009). К настоящему времени коммерчески доступны новые детекторы, обладающие лучшими характеристиками. Для измерения водорода перспективным является использование импульсного газоразрядного детектора (Pulse Discharge Detector, производство VALCO, США), опыт применения которого показал хорошие результаты (Steele et al., 2007).

В ГГО при поддержке проекта Европейской комиссии EUROHYDROS создана газохроматографическая установка для измерения концентрации водорода в атмосферном воздухе.

1. Описание установки

Установка создана на базе отечественного хроматографа «Кристалл-5000.2» фирмы «ХРОМАТЕК». В ней использован импульсный газоразрядный детектор (VALCO, США), обладающий широким диапазоном линейности (10^6 — 10^7), который чувствителен к большинству атмосферных газов. На рис.1 приведена газовая схема установки.

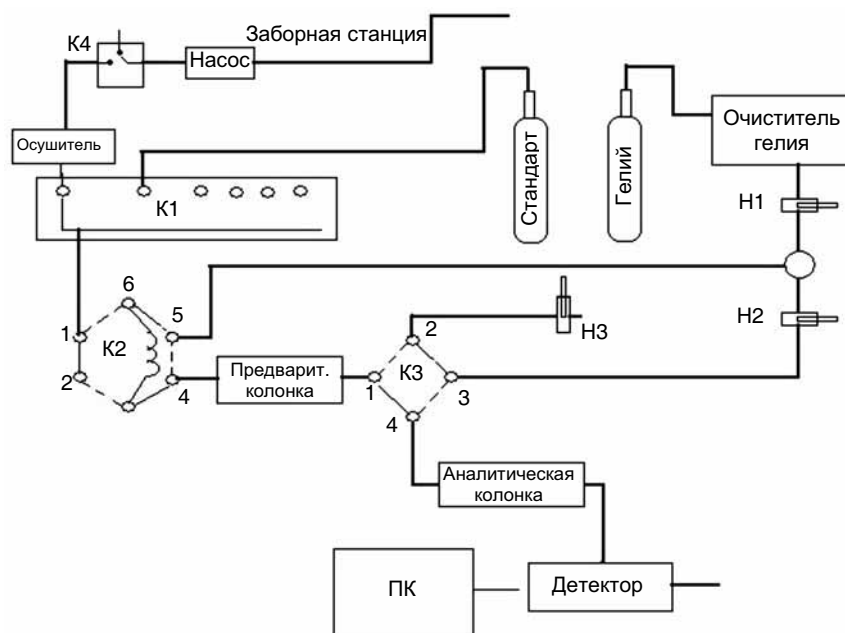


Рис. 1. Газовая схема установки для измерений содержания водорода в атмосфере.

K1, K2, K3, K4 — краны, формирующие газовые потоки; N1, N2, N3 — регуляторы потоков.

На схеме штриховые и сплошные линии показывают пути газов при различном положении кранов. Краны К2 и К3 — двухпозиционные. Кран К1 — селекторный, соединяет выход крана с одним из шести его входов.

В качестве газа-носителя используется гелий высокой чистоты 5.0. Дополнительная очистка гелия от примесей с помощью очистителя (см. рис. 1) позволяет снизить предел обнаружения газов до единиц млрд⁻¹.

Для уверенного хроматографического разделения неона и водорода, первыми выходящими из колонки, длина колонки должна быть достаточно большой. Вместе с тем, при длинной колонке требуется много времени (десятки минут) для продува колонки от больших количеств кислорода и азота, выходящих вслед за водородом. Для сокращения периода измерений в данной схеме установлены две насадочные колонки с сорбентом MoleSieve 5A. Одна используется в качестве предварительной, другая — в качестве аналитической.

Селекторный кран К1 подает на вход крана-дозатора К2 либо исследуемый газ, либо стандартный газ из баллона с известной концентрацией водорода. После продува пробоотборной петли кран-дозатор переключается в положение «ввод пробы». При этом кран К3 соединяет предварительную колонку последовательно с аналитической. После поступления пика водорода в аналитическую колонку предварительная колонка переключается на сброс при повышенном расходе газа-носителя. Это позволяет не запускать в аналитическую колонку большие количества кислорода и азота, выходящие после водорода. Сравнительно короткая (1,5 м) предварительная колонка поддерживается при температуре 120 °С и в режиме сброса имеет повышенный расход газа-носителя (устанавливаемый регулятором НЗ), что позволяет вывести из нее большую часть кислорода и азота за 5—7 мин. Аналитическая колонка имеет длину 4,5 м и рабочую температуру 80 °С. Такой режим позволяет уверенно разделять пики неона и водорода.

Выход аналитической колонки соединен с детектором. Аналоговый сигнал детектора регистрируется компьютером (ПК на

рис. 1), после чего обрабатывается. Через заборную линию воздух прокачивается постоянно для исключения влияния объема заборной линии. Кран К4 переключает исследуемый газ на продув пробоотборной петли. Перед продувом петли проба воздуха осушается. Регуляторы Н1, Н2 и Н3 служат для установки потоков газа-носителя соответственно при прохождении последовательно через обе колонки (предварительная и аналитическая), через аналитическую колонку и предварительную колонку отдельно в режиме сброса.

Процесс измерения (управление газовыми потоками, регистрация и обработка хроматограмм) полностью автоматизирован.

На рис. 2 приводится образец полученной хроматограммы. Слабый первый пик соответствует неону, последующий пик — водороду. Из рисунка видно, что при выбранной схеме установки и режимах удалось добиться уверенного разделения пиков.

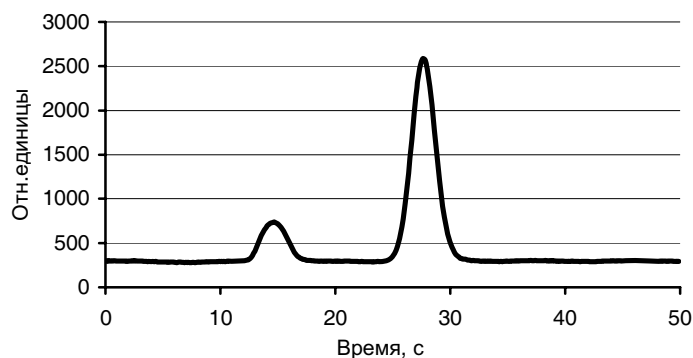


Рис. 2. Образец хроматограммы.

2. Обеспечение качества измерений

2.1. Калибровка

Для обеспечения возможности интерпретации данных измерений с целью получения характеристик источников эмиссии предъявляются высокие требования к их качеству и сопостави-

мости с данными других институтов. Одним из неперменных условий обеспечения высокого качества результатов измерений является калибровка хроматографа. Калибровка осуществляется при каждом измерении, что позволяет существенно снизить влияние нестабильности параметров установки. Калибровка хроматографа осуществляется относительно рабочей газовой смеси, которая, в свою очередь, калибруется относительно лабораторного стандарта. Лабораторный стандарт был предоставлен Институтом Макса Планка (Йена, Германия) и состоит из трех баллонов, заполненных сухим атмосферным воздухом с концентрациями H_2 в диапазоне 422—791 млрд⁻¹.

2.2. Контроль качества данных

Система контроля качества данных включает две основные процедуры:

контроль стабильности концентрации H_2 в рабочей калибровочной смеси,

контроль состояния установки в целом.

Контроль стабильности концентрации H_2 в рабочей калибровочной смеси осуществляется ежемесячно и проводится путем калибровки рабочего стандарта относительно лабораторных стандартных газовых смесей. Результаты контроля представлены в табл. 1.

Контроль состояния установки в целом осуществляется ежедневно и проводится путем измерения концентрации водорода в специально подготовленном баллоне с атмосферным воздухом и известной концентрацией водорода (тестовый газ, концентрация водорода в котором установлена относительно стандартных газовых смесей). Результаты контроля установки представлены на рис. 3.

Критерием приемлемости результатов контроля качества получаемых данных является совпадение в пределах требуемой относительной погрешности измерений ($\pm 1\%$) измеренных значений концентрации H_2 с установленной в результате калибровки относительно лабораторных стандартных газовых смесей величиной концентрации. При этом СКО для серии измерений также не должны превышать 1% .

Таблица 1

**Результаты калибровки рабочего стандарта относительно
лабораторного стандарта**

Дата калибровки	Концентрация рабочего стандарта Н ₂ , млрд ⁻¹	СКО, млрд ⁻¹ (10 измерений в серии)
30.09.2008	479,1	2,04
30.09.2008	481,2	3,40
14.11.2008	481,4	2,10
22.12.2008	480,6	0,98
22.12.2008	481,4	1,70
23.01.2009	479,8	1,24
23.01.2009	480,6	1,43
Среднее	480,6	
СКО	0,9	



Рис. 3. Результаты ежедневного контроля качества измерений путем измерения концентрации водорода в баллоне с тестовым газом.

Пределы допустимой погрешности указаны штриховыми линиями.

Рисунок 4 демонстрирует воспроизводимость результатов измерений, выполненных на установке ГГО (СКО не более $1,3 \text{ млрд}^{-1}$), сопоставимость их с результатами измерений, выполненных в Институте Макса Планка (отличие не более $1,1 \text{ млрд}^{-1}$), а также линейность используемого приемника в диапазоне представленных на рисунке концентраций.

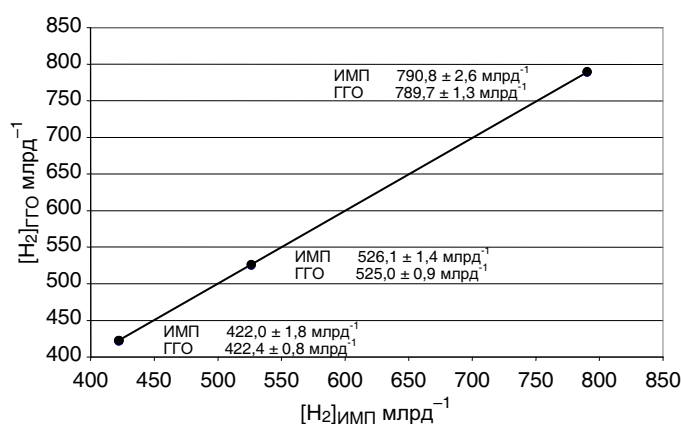


Рис. 4. Сравнение результатов измерений концентрации H_2 в газовых смесях, выполненных ГУ «ГГО» и Институтом Макса Планка (ИМП).

3. Суточная изменчивость концентрации водорода по результатам измерений на станции Воейково

В 2009 г. были проведены измерения суточных концентраций водорода, вариации которых определяются действующими в окрестностях места наблюдений источниками и стоками исследуемого газа и условиями переноса и разбавления примеси. Измерения проводились на экспериментальной базе ГГО в поселке Воейково ($59^{\circ}57'$ с. ш., $30^{\circ}42'$ в. д.), расположенном в 12 км к востоку от административной границы Санкт-Петербурга. Территория города и его индустриальных пригородов находится в северо-западном и юго-западном направлениях (200 — 300°) от места наблюдений, а к

северо-востоку и юго-востоку ($0-175^\circ$) располагается малонаселенная заболоченная низменность, протянувшаяся до побережья Ладожского озера и практически свободная от антропогенных источников. Такое местоположение создает благоприятные условия для проведения измерений с целью изучения эмиссии парниковых газов с территории большого промышленного центра.

Изменение со временем как интенсивности выбросов, так и условий перемешивания примеси в атмосфере приводит к сильной изменчивости суточного хода концентрации водорода. Примеры суточного хода по результатам измерений в Воейково показаны на рис. 5. При направлениях ветра из сектора, свободного от антропогенных источников, концентрация водорода остается практически неизменной в течение суток (см. рис. 5 для 15.09.2008). Вариации концентрации H_2 за 15.09.2008 характеризуются СКО, равным 7 млрд^{-1} .

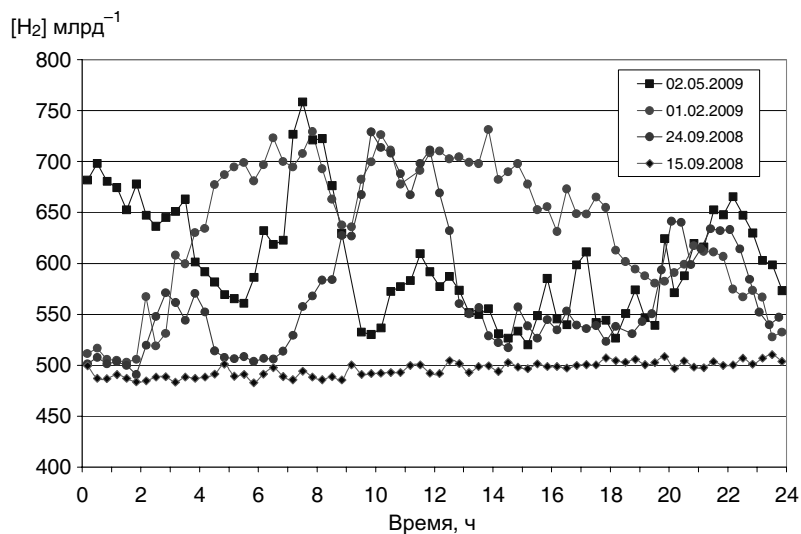


Рис. 5. Примеры суточного хода концентрации водорода для ст. Воейково при направлении ветра со стороны Санкт-Петербурга (02.05.2009, 01.02.2009, 24.09.2008) и из «чистого» сектора (15.09.2008).

При направлении ветра со стороны Санкт-Петербурга, где расположены основные источники, суточный ход концентрации водорода отличается большой изменчивостью. Наблюдаемые вариации концентрации H_2 достигают 200—250 млрд⁻¹, причем максимумы концентрации H_2 наблюдаются в разное время суток. Влияние антропогенных источников, приводящее к возрастанию концентрации H_2 до 1000 млрд⁻¹ отмечается в других работах, выполненных для территорий, расположенных в окрестностях крупных промышленных центров (Steinbacher et al., 2007). Для интерпретации наблюдаемых вариаций на ст. Воейково требуются систематические измерения, охватывающие широкий диапазон условий.

Результаты наблюдений, представленные на рис. 5, позволяют констатировать существенное влияние такого крупного промышленного центра, как Санкт-Петербург, на концентрацию одного из наиболее важных парниковых газов непрямого действия — водорода.

Заключение

В ГГО создана газохроматографическая установка для измерения концентрации водорода в атмосферном воздухе, который является парниковым газом непрямого действия. Установка создана на базе хроматографа «Кристалл-5000.2» фирмы «ХРОМАТЕК» с использованием импульсного газоразрядного детектора, обладающего высокой степенью линейности в широком диапазоне измеряемых концентраций. Случайная погрешность измерений не превышает 1 %, что соответствует нормам ВМО. Установка имеет систему контроля качества измерений.

Новая аппаратура позволяет расширить число контролируемых компонентов на действующих станциях мониторинга парниковых газов.

Выполнены пробные измерения концентрации водорода в атмосфере на станции Воейково.

Работа выполнена при поддержке гранта ЕС «EUROHYDROS», контракт № 036916.

Авторы благодарят сотрудников ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» И. И. Вассерман и В. И. Соболева за помощь при создании установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Novelli P.C., Lang, P.L., Masarie, K.A., Hurst, D.F., Myers, R., Elkins, J.W. (1999). Molecular hydrogen in the troposphere: Global distribution and budget. — *J. Geophys. Res.*, 104, 30427—30444.

Lallo M., T. Aalto, J. Hatakka and T. Laurila (2009). Hydrogen soil deposition at an urban site in Finland. — *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9, 14873—14899.

Hammer S. (2008). Quantification of the regional H₂ sources and sinks inferred from atmospheric trace gas variability. — PhD Thesis. University of Heidelberg, Germany.

Steele L.P., L.W.Porter, M.V. van der Schoot and R.L.Langenheds (2007). Measuring selected atmospheric trace gases using gas chromatography and VALCO discharge ionization detector. — *Proc. 14th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Tracer Measurement Techniques*. Helsinki, 10—13 September 2007. Program and Abstracts, p. 51.

Steinbacher M., Fischer A., Vollmer M.K., Reimann S., Huglin C. (2007). Perennial observations of molecular hydrogen (H₂) at a suburban site in Switzerland. — *Atm. Environ.*, 41, 2111—2124.

УДК 581.586

**ОЧЕНЬ СИЛЬНЫЕ МОРОЗЫ НА ТЕРРИТОРИИ
АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ И НЕНЕЦКОГО
АВТОНОМНОГО ОКРУГА**

И. В. Грищенко

Архангельский центр по гидрометеорологии и мониторингу
загрязнения окружающей среды с региональными функциями
(ГУ Архангельский ГМС-Р)
Архангельск, ул. Маяковского, 2
sevmgmc@arh.ru

Поступила в редакцию 1.02.2010
Поступила после доработки 3.03.2010

Введение

Для России сильные морозы являются самым распространенным опасным явлением погоды (ОЯП), которое наблюдается на всей ее территории (Карлин, Абрамов, 2006). Территория Архангельской области и Ненецкого автономного округа (НАО) расположена в основном севернее 60° с. ш. (часть территории НАО находится за пределами Северного полярного круга). В связи с этим там регулярно наблюдаются сильные морозы.

Опасное гидрометеорологическое явление (ОЯ) — это явление, которое по интенсивности развития, продолжительности или моменту возникновения может представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также может причинить значительный материальный ущерб (РД 52.88.699—2008).

Из определения следует, что опасно не само явление — в данном случае сильные морозы, а его последствия для жизнедеятельности и хозяйственной активности человека.

Поражающим фактором при этом являются не только низкая температура, но и продолжительность периода с низкой температурой. Глубина промерзания грунтов и стен зданий зависит при прочих равных условиях от времени воздействия.

Морозы увеличивают вероятность технических аварий. При температуре –30 °С и ниже существенно снижается прочность металлических и пластмассовых деталей и конструкций.

Ущерб от сильных морозов связан с гибелью людей от переохлаждения, замораживанием технических объектов, разрушением систем отопления, повреждениями в ЖКХ населенных пунктов, в первую очередь систем водоснабжения. Нарушения в тепло-снабжении и водоснабжении населенных пунктов приводят к значительной социальной напряженности.

Особый интерес представляют экстремальные значения температуры воздуха — явление, хотя и достаточно редкое, но представляющее серьезную угрозу при любой продолжительности и для населения, и для хозяйствующих субъектов.

Закономерности возникновения сильных морозов на территории Архангельской области и НАО

В целях повышения уровня предсказуемости наступления экстремальных температур была проведена статистическая обработка случаев с очень сильными морозами (минимальная температура воздуха $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже), а также систематизация синоптических ситуаций, благоприятных для данного ОЯП, которая позволила выявить некоторые закономерности возникновения этого опасного явления на территории Архангельской области и НАО.

За период 1966—2008 гг. морозы $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже были зафиксированы на 30 метеостанциях Архангельской области и НАО. Было рассмотрено 195 дней с сильными морозами, наблюдавшимися на одной и более метеорологических станциях одновременно.

На режим минимальной температуры воздуха в большей степени, чем на среднюю месячную температуру, оказывают влияние особенности местоположения метеорологической станции (характер рельефа, близость больших водоемов, микроклиматические особенности подстилающей поверхности и т. д.). Минимальная температура меняется с высотой местности (Климат России, 2001).

Морозы с температурой воздуха $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже характерны в основном для континентальной части территории; только на четырех прибрежных метеорологических станциях, три из которых расположены в НАО, наблюдались сильные морозы.

Средняя повторяемость сильных морозов за исследуемый период составила 0,1—1,6 дней в год, составив в 73,3 % случаев менее 0,5 дней в год.

Наиболее часто сильные морозы наблюдаются в восточной половине Архангельской области и континентальных районах НАО, где их повторяемость составляет от 0,8 до 1,6 дней в год (рис. 1).

На остальной территории повторяемость таких морозов составила 0,3 дней в год и менее.

Ни разу температура воздуха не понижалась до -45°C на юго-западе Архангельской области, где расположена Няндомско-Коношская возвышенность. Очевидно, сказывается фактор повышенного рельефа.

Продолжительность периодов с очень сильными морозами, как правило, не превышает трех дней (77,3 % случаев). В особенно холодные зимы, например в декабре 1978 г. и в январе 1999 г., отмечены случаи, когда продолжительность периодов с температурой воздуха ниже -45°C на ряде метеорологических станций составила четыре дня и более. Самый продолжительный период с очень сильными морозами (восемь дней) зафиксирован на метеостанции Коткино (территория НАО) с 22 по 29 января 1999 г.

Наиболее часто морозы ниже -45°C наблюдаются в январе (61 % случаев) и феврале (23 %). Вместе с тем, на отдельных метеорологических станциях НАО отмечены случаи и в марте, и в ноябре (рис. 2).

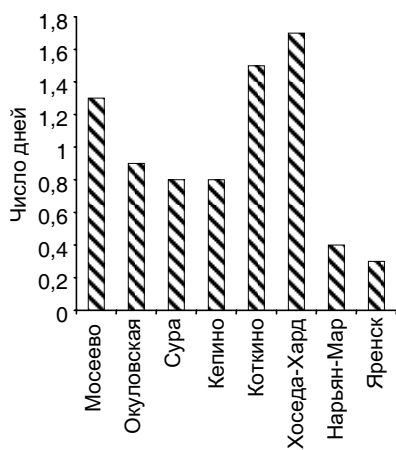


Рис. 1. Средняя годовая повторяемость (число дней) сильных морозов на территории Архангельской области и НАО.

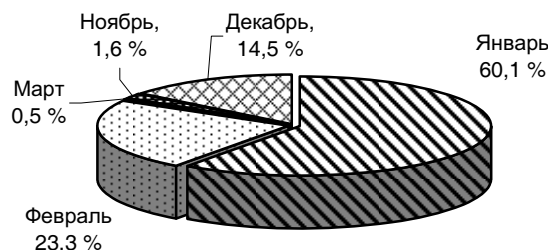


Рис. 2. Распределение числа дней с очень сильными морозами (ниже -45°C) по месяцам — доля (%) общего числа дней с сильными морозами в году.

Самые низкие температуры воздуха наблюдались 29—30 января 1978 г. на метеорологических станциях Борковская ($-54,1^{\circ}\text{C}$) и Окуловская ($-52,1^{\circ}\text{C}$), 28 января 1973 г. на метеорологической станции Сура ($-52,5^{\circ}\text{C}$).

Для того чтобы по возможности устранить фактор влияния особенностей местоположения метеорологических станций на общие закономерности формирования экстремальных температур, рассматривались наиболее интересные случаи, когда сильными морозами были охвачены значительные территории, т. е. экстремальная температура, зафиксированная на конкретной метеорологической станции, не была случайной.

Кроме того, анализ таких случаев важен при решении прикладных задач, в частности при проектировании и непосредственном обслуживании объектов нефтегазодобывающей отрасли, имеющих большую протяженность.

За период 1966—2008 гг. можно выделить несколько лет с суровыми зимами, во время которых отмечались очень сильные морозы, охватывавшие значительную часть территории (более 30 %) и наблюдавшиеся в течение двух—четырёх дней подряд, — это 1966, 1967, 1969, 1973, 1978, 1979, 1982, 1985, 1987, 1998, 1999 гг. 29—30 декабря 1978 г. сильными морозами ($T < -45^{\circ}\text{C}$) было охвачено от 45 до 55 % территории. При этом продолжительность морозного периода составила от двух до четырёх дней.

Для анализа тенденции изменения числа дней за год с очень сильными морозами ($T < -45\text{ }^{\circ}\text{C}$) был построен линейный тренд для периода 1966—2008 гг. (рис. 3):

$$y = -0,1741x + 350,43; \quad R^2 = 23,77\% .$$

Из рисунка видно, что число дней за год с очень сильными морозами в указанный период уменьшилось.

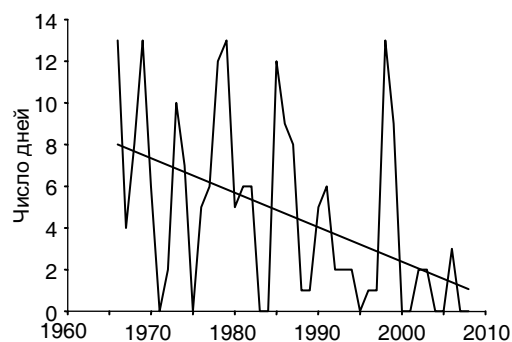


Рис. 3. Временной ряд числа дней за год с очень сильными морозами и его линейный тренд для территории Архангельской области и НАО за период 1966—2008 гг.

Циркуляционные и синоптические условия возникновения сильных морозов

В зимнее время, когда приток солнечной радиации мал или отсутствует совсем (выше Северного полярного круга), основным климатообразующим фактором являются циркуляционные процессы (Климат России, 2001).

Для выявления связи очень сильных морозов с циркуляционным фактором были исследованы зависимости периодов с сильными морозами от типов элементарных синоптических процессов (ЭСП). При этом был использован календарный каталог атмосферных процессов по циркумполярной зоне Северного полушария, полученный в ГУ ААНИИ (Дмитриев, Беязо, 2006).

В период 1966—1983 гг. (циркуляционные эпохи меридиональных форм $E + C$ и E) на территории Архангельской области и НАО наблюдалось 143 дня с сильными морозами. В период 1984—2008 гг. (циркуляционная эпоха W) число дней с очень сильными морозами уменьшилось до 79. В этот период отмечался и положительный тренд в изменении средней годовой температуры воздуха.

Более детальный анализ форм циркуляции в течение каждого месяца показывает, что в 73,3 % случаев сильные морозы связаны с ЭСП, характеризовавшимися формами меридиональной циркуляции (E — 45,1 % и C — 28,2 %). Особенно четко эта связь проявилась в случаях, когда очень сильными морозами были охвачены значительные территории. Из девяти таких лет (1966, 1967, 1973, 1978, 1979, 1982, 1985, 1987, 1999 гг.) в семи морозы были обусловлены установлением меридиональной формы циркуляции. При этом в шести случаях периодам с сильными морозами предшествовали ЭСП с зональной формой циркуляции.

Данные формы циркуляции выражены в следующих характерных типах синоптических ситуаций:

1) наличие на изобарической поверхности 500 гПа глубокого циклона (496—484 гПа) над Полярным Уралом, акваторией Карского моря или полуостровом Таймыр, а в приземном слое — многоцентровой циклонической депрессии (давление около 1000 гПа) или размытого поля повышенного давления (рис. 4);

2) наличие на изобарической поверхности 500 гПа глубокого циклона (496—484 гПа) над районами Норильска — Обской губы и образование в дальнейшем в его ложбине высотного циклона над территорией НАО; в приземном слое — вторжение арктического антициклона (давление 1035—1040 гПа), сформировавшегося над акваторией Карского моря и районом Новой Земли, на территорию Архангельской области (рис. 5);

3) сочетание трех благоприятных факторов — наличие на изобарической поверхности 500 гПа глубоких циклонов (496—484 гПа) над районами Таймыра — Обской губы или центральным районом России, наличие в приземном слое гребня арктического антициклона с центром над акваторией Карского моря и выход циклона с территории Украины в район Среднего Поволжья и усиление адвекции холода на территорию Архангельской области и НАО по его северной периферии (рис. 6);

4) формирование на изобарической поверхности 500 гПа над территорией Архангельской области высотного гребня; в приземном слое наличие антициклона с давлением 1030—1040 гПа с центром над территорией НАО (рис. 7).

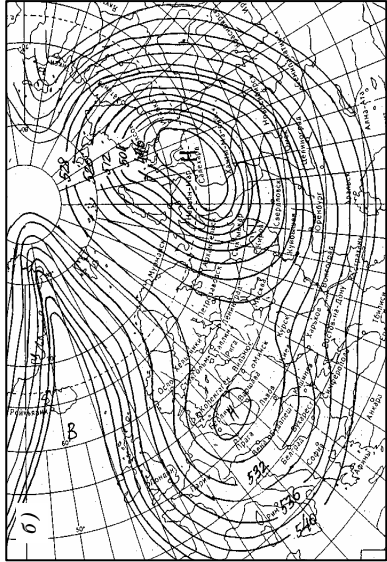
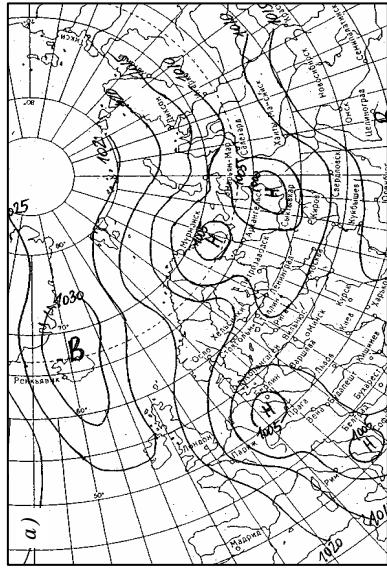


Рис. 4. Синоптическая ситуация первого типа: карты приземного анализа (а) и АТ 500 (б) за 02 января 1985 г.

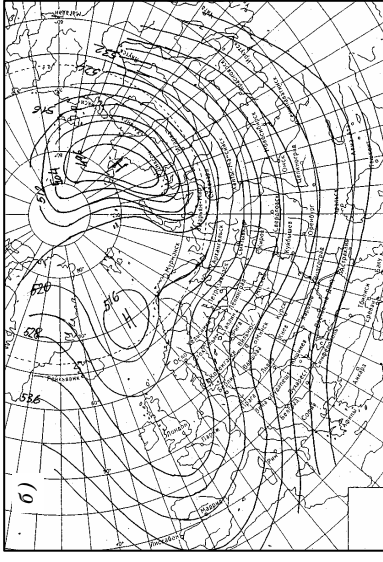
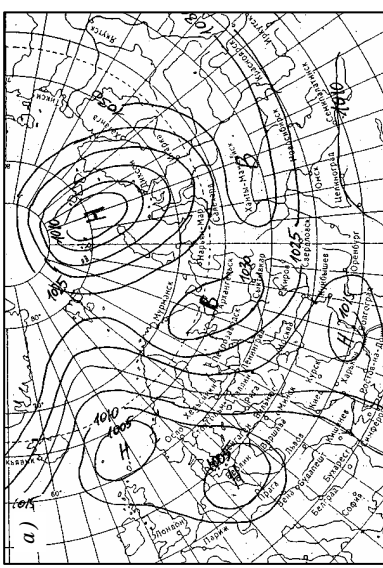


Рис. 5. Синоптическая ситуация второго типа: карты приземного анализа (а) и АТ 500 (б) за 24 января 1979 г.

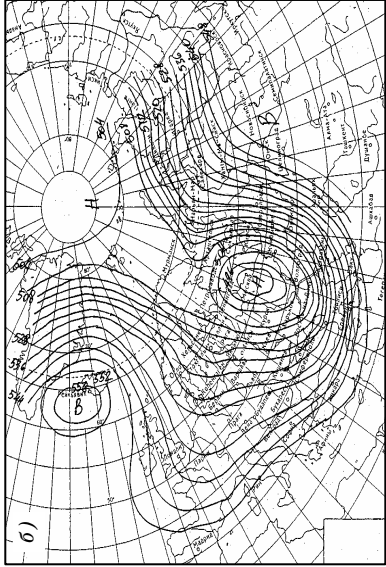
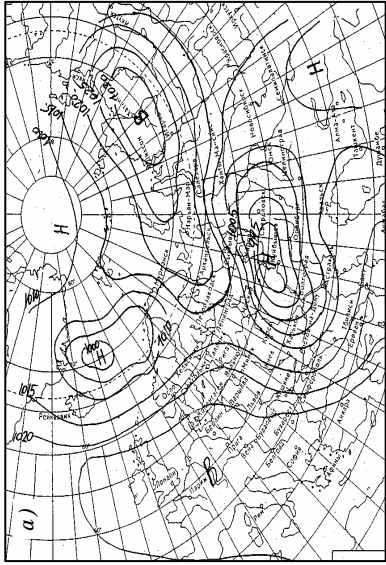


Рис. 6. Синоптическая ситуация третьего типа: карты приземного анализа (а) и АТ 500 (б) за 9 января 1982 г.

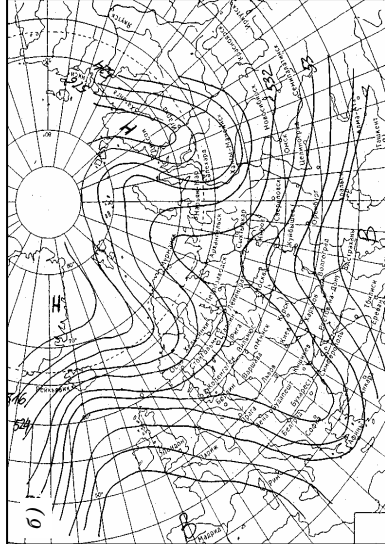
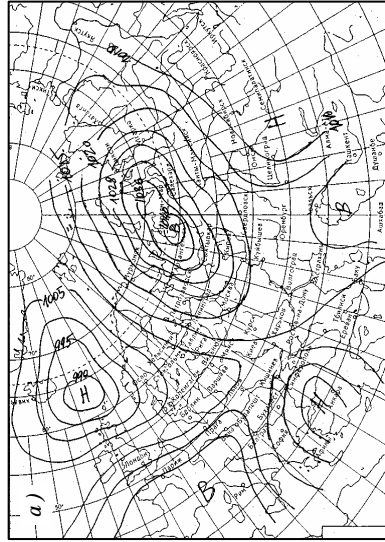


Рис. 7. Синоптическая ситуация четвертого типа: карты приземного анализа (а) и АТ 500 (б) за 29 января 1973 г.

Таким образом, в большинстве случаев благоприятной ситуацией для наступления очень сильных морозов является формирование в средней тропосфере над районами Карского моря — полуостровом Таймыр мощного циклонического вихря, в тылу которого происходит интенсивная адвекция холода.

Анализ термического поля на высотах показывает, что необходимым условием для наступления сильных морозов является одновременное формирование очагов холода с температурами $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже на уровне 500 гПа и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже на уровне 850 гПа. Как правило, этот процесс занимает несколько дней, что дает возможность спрогнозировать смещение очага холода на соответствующие территории достаточно точно.

Заключение

В силу инерционности процессов, приводящих к наступлению сильных морозов, это опасное явление погоды в отличие от других (сильного ветра, шквалов, сильных метелей и т. д.) является достаточно предсказуемыми. В настоящее время сочетание надежных гидродинамических схем с синоптико-статистическими зависимостями для каждой конкретной территории позволяет успешно прогнозировать сильные морозы с заблаговременностью три—пять дней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Климат России (2001). Под редакцией Н. В. Кобышевой. — СПб.: Гидрометеоиздат.

Дмитриев А.А., Беязо В.А. (2006). Космос, планетарная климатическая изменчивость и атмосфера полярных регионов. — СПб.: Гидрометеоиздат.

Карлин Л.Н., Абрамов В.М. (2006). Управление энвиронментальными и экологическими рисками. — СПб.

РД 52.88.699—2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений.

Нина Владимировна Кобышева

К 85-летию со дня рождения

24 апреля 2010 г. отметила свое 85-летие Нина Владимировна Кобышева, доктор географических наук, профессор кафедры климатологии и мониторинга окружающей среды факультета географии и геоэкологии СПбГУ, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующая лабораторией технической климатологии и стихийных явлений Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова.

Нина Владимировна — ведущий специалист в области прикладной климатологии, ее работы получили признание как в нашей стране, так и далеко за ее пределами.

Н. В. Кобышева родилась в Омске. В 1947 г. она окончила Одесский гидрометеорологический институт, в 1955 г. — аспирантуру Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова.

До 1974 г. Н. В. Кобышева работала доцентом на кафедре физики атмосферы в Военно-инженерной академии им. А. Ф. Можайского. В 1972 г. защитила докторскую диссертацию, посвященную косвенным расчетам климатических характеристик, в 1982 г. получила звание профессора.

С 1974 г. и по настоящее время заведует лабораторией технической климатологии и стихийных явлений ГГО.

Нина Владимировна внесла неоценимый вклад в отечественную климатологию и по праву считается авторитетнейшим специалистом в области прикладной климатологии.

Н. В. Кобышева — автор 15 монографий, изданных на русском и английском языках («Климат России» (2001), «Климат и железнодорожный транспорт» (2005), «Энциклопедия климатических ресурсов РФ» (2005) и др.), пяти учебников по прикладной климатологии и более 200 статей.

Под ее руководством и при ее непосредственном участии подготавливаются многотомные справочники и нормативные документы (главы строительных норм, правил, СНиП, ГОСТы для технических целей и др.), Труды ГГО и осуществляется научное

руководство отделами и группами климатологов в управлениях Гидрометслужбы России.

Н. В. Кобышева является членом диссертационных советов ГГО и СПбГУ. В ее послужном списке — защиты кандидатских диссертаций 29 аспирантами. Молодые специалисты перенимают у Нины Владимировны не только знания и опыт, но и умение быть преданным своей профессии.

В последние 30 лет Нина Владимировна ведет активную международную деятельность, являясь членом рабочих групп Всемирной метеорологической организации (ВМО) и ряда других международных организаций (МЭК, МСС, ИСО). За подготовку технической записки ВМО «Руководство по климатическим расчетам в строительном проектировании» генеральным секретарем ВМО ей объявлена благодарность и выдан сертификат ВМО. Н. В. Кобышева имеет ряд государственных и ведомственных наград.

Нину Владимировну отличает неиссякаемая энергия, оптимизм, постоянное стремление найти пути решения самых сложных теоретических и практических задач.

Коллектив Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова от души поздравляет Нину Владимировну с юбилеем, желает доброго здоровья, благополучия и плодотворного продолжения творческой деятельности на благо отечественной науки.

Эмма Юрьевна Безуглая

К 80-летию со дня рождения

9 марта 2010 г. отметила свой юбилей Эмма Юрьевна Безуглая, доктор географических наук, широко известный специалист в области мониторинга загрязнения атмосферного воздуха.

Э. Ю. Безуглая родилась в Рязани. Ее детство и школьные годы прошли в старинном городе Полоцке. По окончании средней школы Эмма Юрьевна поступила на метеорологический факультет Ленинградского гидрометеорологического института. Получив в 1953 г. диплом с отличием, более девяти лет работала инженером-аэрологом и старшим инженером сначала на Камчатке, затем в Магадане.

В 1962 г. Э. Ю. Безуглая поступила в аспирантуру Центральной аэрологической обсерватории, по окончании которой успешно защитила диссертацию на географическом факультете МГУ.

С 1965 г. Эмма Юрьевна трудится в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Сфера ее научных интересов — всестороннее изучение загрязнения атмосферного воздуха в городах.

Э. Ю. Безуглой были выполнены фундаментальные климатологические исследования загрязнения атмосферы. Под ее руководством было создано справочное пособие «Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере», широко используемое на практике. Ею была разработана методика расчета комплексного показателя метеорологических характеристик рассеяния примесей, создана карта потенциала загрязнения атмосферы. Результаты ее исследований обобщены в монографии «Метеорологический потенциал и загрязнение атмосферы».

Фундаментальным трудом в области изучения загрязнения атмосферы стала диссертация Э. Ю. Безуглой на соискание ученой степени доктора географических наук «Исследования климатологических особенностей загрязнения воздуха городов и условий рассеяния примесей на территории СССР», которую она защитила в 1980 г.

При активном участии Э. Ю. Безуглой создавалась сеть наблюдений за загрязнением атмосферы в городах, участие в методическом руководстве которой она принимает и в настоящее время. Она является одним из авторов широко известного документа «Руководство по контролю загрязнения атмосферы». Э. Ю. Безуглой разработаны основные правила обобщения информации о концентрациях примесей в атмосфере городов, способы определения тенденций за длительный период, руководящие документы по подготовке и обобщению информации о загрязнении атмосферы.

На протяжении многих лет Э. Ю. Безуглая возглавляет работы по подготовке и изданию Ежегодников «Загрязнение атмосферы в городах на территории Российской Федерации» (ранее на территории СССР). Каждый Ежегодник, а их издано под ее руководством более сорока, представляет собой справочный документ, содержащий важную и точную информацию для широкого круга пользователей.

На протяжении многих лет Э. Ю. Безуглая является активным участником международного сотрудничества. В годы перестройки она участвовала в подготовке международного издания Атласа «Окружающая среда и здоровье населения России». В течение пяти лет при ее активном участии выполнялся проект, руководство которым осуществлялось Службой планирования качества воздуха и стандартов Агентства по охране окружающей среды США. За «неоценимый вклад в Проект по управлению качеством воздуха в России» Э. Ю. Безуглой была вручена благодарственная грамота Агентства по охране окружающей среды США.

Эмма Юрьевна также руководила работой по подготовке доклада «Качество воздуха в крупнейших европейских городах» для европейской конференции министров охраны окружающей среды.

Э. Ю. Безуглая является автором четырех монографий и более 200 статей.

Э. Ю. Безуглая награждена Орденом Почета, медалью «За трудовое отличие», почетным знаком «Отличник Гидрометслуж-

бы СССР». Ее деятельность многократно отмечена грамотами ГГО, Росгидромета, дипломами ВДНХ СССР.

В настоящее время Эмма Юрьевна продолжает активную творческую деятельность, занимаясь новыми исследованиями, в частности исследованиями по химии атмосферы.

Коллектив сотрудников Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова сердечно поздравляет Эмму Юрьевну с юбилеем, желает ей доброго здоровья, неиссякаемой энергии и новых творческих успехов!

Памяти Леонида Вульфовича Руховца (1930—2008)

К 80-летию со дня рождения

Леонид Вульфович Руховец — видный ученый-метеоролог, один из ведущих представителей петербургской научной школы динамической метеорологии.

Л. В. Руховец родился 7 июня 1930 г. в Ленинграде. Окончив среднюю школу, он поступил на математико-механический факультет Ленинградского государственного университета, который закончил с отличием в 1952 г. По окончании Университета был направлен преподавателем в среднюю школу в деревню Новгородской области.

В 1957 г. Л. В. Руховец поступил в отдел динамической метеорологии Главной геофизической обсерватории, где проработал более 30 лет.

Первые научные успехи Леонида Вульфовича в метеорологии были связаны с численными методами прогнозов погоды и их реализацией на ЭВМ. Он является автором малопараметрической модели атмосферы, нашедшей практическое использование в прогнозе погоды. В 1960-х годах разработанная им совместно с его коллегами численная модель краткосрочного прогноза погоды ГГО широко использовалась в оперативной практике ряда управлений Гидрометслужбы, а также в оперативной службе прогнозов Польской Народной Республики.

В 1964 г. Л. В. Руховец защитил кандидатскую диссертацию «Численный прогноз с использованием свойств вертикальной структуры метеорологических полей».

Заметное место в научной деятельности Л. В. Руховца заняли фундаментальные исследования тропопаузы и ее влияния на распределение метеорологических величин. Большой цикл его работ посвящен методу разложения метеорологических полей по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ). Исследуя свойства оптимальных представлений вертикальных профилей метеорологических величин, он показал статистическую устойчивость ЭОФ.

Эти результаты нашли отражение в опубликованной в 1970 г. монографии «Естественные составляющие метеорологических полей», одним из авторов которой был Л. В. Руховец. Эта книга сыграла значительную роль в дальнейшем развитии объективного анализа метеорологических полей и численного прогноза погоды.

Л. В. Руховец обладал незаурядным организаторским талантом, успешно осуществил подготовку ряда важных отечественных и международных научных конференций. Леонидом Вульфовичем было опубликовано свыше 80 научных работ, он подготовил нескольких кандидатов наук.

В 1989 г. Л. В. Руховец вместе с семьей покинул СССР и переехал на жительство в Соединенные Штаты Америки. Там он продолжал научную деятельность в Нью-Йоркском университете в Стони Брук, а затем в Национальном метеорологическом центре США и Национальном управлении США по авиации и исследованию космического пространства (НАСА).

Научная деятельность Леонида Вульфовича в этих организациях была направлена на развитие важнейших направлений анализа и прогноза погоды. Его новые работы, как и предшествующие, отличала практическая направленность. Разработанный им совместно с его американскими коллегами метод мультимодельного прогноза на сроки до 10 суток на основе оптимального осреднения результатов прогноза отдельных членов ансамбля был использован в оперативной практике Национального метеорологического центра США.

В последние годы особое внимание Л. В. Руховец уделял проблеме контроля качества данных наблюдений. Им и его коллегами был разработан эффективный метод контроля данных наблюдений, позволявший, в частности, существенно улучшить анализ и прогноз штормовых явлений.

Леонид Вульфович был обаятельным, жизнерадостным, общительным человеком. Он живо откликался на все значительные события внутренней и международной жизни, был активным автолюбителем, увлекался коллекционированием редких марок, был ценителем хорошей эстрадной музыки.

Обладая блестящим педагогическим талантом, Л. В. Руховец своими содержательными лекциями и яркими выступлениями был способен увлечь любую аудиторию.

Последние месяцы жизни Леонид Вульфович провел в семье своего сына, окружившей его теплом и заботой.

Л. В. Руховец скончался 13 апреля 2008 г. Память о нем навсегда останется в сердцах его коллег и всех, кто его знал.

Сборник научных трудов

Труды ГГО, вып. 561

Подписано в печать 31.05.2010. Формат $60 \times 84^{1/16}$. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 20,0. Тираж 300 экз. Заказ

Отпечатано в типографии ООО «САВОЖ».

195279, Санкт-Петербург, ш. Революции, 69, лит. А.

УДК 551.58:551.509.3

К вопросу о предотвращении глобального потепления посредством рассеивания сульфатного аэрозоля в стратосфере. Мелешко В. П., Катцов В. М., Кароль И. Л. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 7—27.

Многочисленные исследования показывают, что глобальное потепление климата, вызванное ростом содержания парниковых газов в атмосфере, может оказать существенное влияние на окружающую среду уже в ближайшие десятилетия. Чтобы смягчить или предотвратить возможные негативные последствия этого потепления, в настоящее время обсуждаются технологии как сокращения выбросов парниковых газов, так и преднамеренного воздействия на климат, включая его регулирование. В настоящей работе анализируются современные исследования по оценке влияния одновременного роста концентрации CO_2 в атмосфере и аэрозоля в стратосфере на глобальный и региональный климаты, озоновый слой и окисление Мирового океана. Отмечается, что создание и последующее поддержание искусственного аэрозольного слоя в стратосфере, в принципе, позволило бы устранить или задержать потепление климата, но сопровождалось бы уменьшением глобальных осадков, особенно выраженным в тропической зоне. Более того, создание экрана из стратосферного аэрозоля не решает проблему роста CO_2 в атмосфере, который, в свою очередь, приводит к дальнейшему окислению Мирового океана и тем самым пагубно влияет на морскую часть биосферы. Ярким примером непродуманного вмешательства человека в природную среду с целью ее более эффективного хозяйственного использования служит печальная судьба Аральского моря с серьезными социальными и экономическими последствиями, прямо или косвенно затронувшими все страны Средней Азии. Обсуждаются также вопросы политического и этического характера, связанные с преднамеренным глобальным вмешательством человека в природную среду. Большинство научного сообщества в мире высказывает глубокую озабоченность возможным применением в широких масштабах преднамеренных воздействий на климатическую систему.

Ключевые слова: глобальное потепление, сульфатный аэрозоль, парниковые газы.

Библ. 10.

УДК 551.581, 551.583

О комплексировании ансамбля климатических моделей. Генихович Е. Л., Павлова Т. В., Катцов В. М. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 28—46.

Излагается новый подход к усвоению данных и комплексированию моделей в ансамбле климатических моделей и результаты его испытания. Указанный подход основан на методах аппроксимации и регуляризации многомерных векторов в линейном евклидовом пространстве при использовании неортогонального базиса. В результате оказывается возможным из моделей, включенных в ансамбль, выбрать подмножество моделей, которые могут быть использованы для реконструкции долгопериодных изменений рассматриваемых климатических характеристик.

Проверка применимости данного подхода была проведена с использованием модельных столетних рядов среднегодовых температур, осредненных по всему земному шару и по Северному полушарию. Эти данные были сгенерированы ансамблем из 17 климатических моделей. Эффективность разработанного метода была подтверждена путем сравнения полученных результатов с фактическими данными HadCRUT3. В частности, было показано, что по сравнению со «стандартной оценкой», основанной на использовании среднего по ансамблю, среднеквадратическую ошибку моделирования средних глобальных температур удалось уменьшить в 4—14 раз для «нефильтрованных» и «фильтрованных» временных рядов, соответственно. Для рядов аномалий температуры соответствующее уменьшение составляло примерно 2—4 раза.

Полученные результаты указывают на то, что число моделей, включенных в ансамбль, может оказаться избыточным. Это может быть связано с тем, что временные ряды, генерируемые различными моделями в ансамбле, сравнительно тесно коррелированы друг с другом. Разработанный метод может оказаться перспективным для уменьшения неопределенностей оценок изменений климата в XXI столетии.

Ключевые слова: климатические модели, ансамбль, многомерный вектор, аппроксимация, регуляризация.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 36.

УДК 551.581, 551.583

Дискриминация климатических моделей. Вероятностный подход.
Бекряев Р. В. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 47—66.

Предлагается методика дискриминации климатических моделей, основанная на вероятностном подходе. Такой подход предусматривает тестирование отдельных климатических характеристик путем сопоставления их с оценками, полученными на основе анализа данных наблюдений. Предлагается последовательно анализировать воспроизведение дисперсий, спектральных характеристик, выборочных средних значений и линейных трендов. Развиваемый подход позволяет учитывать автокорреляцию в рядах наблюдаемых и смоделированных данных. Разработанная методика применяется для анализа численных экспериментов с моделями СМIP3. Тестовые испытания были пройдены моделями esam, echo и hadcm3.

Ключевые слова: модели, случайные процессы, дискриминация, автокорреляция.

Ил. 7. Библ. 6.

УДК 551.465

Оценка применимости одномерной модели верхнего квазиоднородного слоя в ключевых районах Мирового океана. Бортковский Р. С., Егоров Б. Н. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 67—83.

Задача определения газообмена океан—атмосфера до сих пор далеко не решена. Современные оценки климата газообмена базируются на диффузионных формулах, в которых поток газа находится как произведение «скорости газообмена» — коэффициента, зависящего от скорости ветра, на разность концентрации растворенного в воде газа на самой поверхности раздела и в подповерхностном слое воды. При этом по умолчанию предполагается, что разность концентрации от скорости ветра не зависит и остается постоянной. Однако такой подход представляется оправданным не только при умеренной скорости ветра, но и при постоянстве условий в верхнем слое океана. При таких серьезных изменениях, как наблюдающиеся проявления Южного колебания, этот подход вряд ли применим. Поэтому используется новый вариант численной модели, ранее примененной для решения различных задач. Применимость одномерных моделей определяется соотношением горизонтальных и вертикальных притоков субстанции: если вертикальные притоки существенно больше горизонтальных, то применение одномерных моделей обоснованно.

Ключевые слова: одномерная модель, газообмен океан—атмосфера, верхний квазиоднородный слой.

Табл. 7. Ил. 3. Библ. 17.

УДК 551.510.04

К оценке эффективности различных химических механизмов при моделировании процессов трансформации загрязняющих веществ в атмосфере.
Мекрюкова Е. В., Генихович Е. Л. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 84—91.

Анализируется эффективность различных (фото)химических механизмов и моделей, которые определяются как совокупность учитываемых химических реакций и соответствующих им скоростей протекания, путем сопоставления результатов расчетов по этим моделям с данными измерений в смоговых камерах концентраций различных атмосферных примесей, участвующих в этих реакциях. Предложен способ сопоставления оценок эффективности, полученных для различных механизмов. С использованием данных лабораторных экспериментов, выполненных в Калифорнийском университете, получены численные оценки для трех наборов реакций, выбранных по литературным источникам.

Полученные результаты могут оказаться полезными для выявления и подтверждения целесообразности выбора того или другого механизма при решении конкретных задач атмосферной химии.

Ключевые слова: моделирование, трансформация веществ, химический механизм, оценка эффективности, смоговые камеры.

Табл. 1. Ил. 1. Библ. 17.

УДК 551.510.42

Прогноз экстремально высоких уровней загрязнения воздуха в городах промышленного региона. Костарева Т. В., Кириллова В. И., Николаев В. Д., Сонькин Л. Р. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 92—103.

Решается задача прогноза экстремально высоких уровней загрязнения воздуха (ЭВУЗВ) для городов промышленного региона. При этом имеется в виду прогноз для каждого города заданного региона, включая города, для которых недостаточно материалов для разработки синоптико-статистических схем прогноза, а также оценка ожидаемого состояния загрязнения воздуха в целом по региону. Показано, что характер влияния синоптических условий на уровень загрязнения воздуха в городах в пределах заданного региона примерно одинаков. В связи с этим для каждого из городов региона может быть принят одинаковый синоптический предиктор Sn . Для подтверждения этого для группы близлежащих городов были разработаны синоптико-статистические схемы прогноза ЭВУЗВ с использованием одинакового предиктора Sn . Все схемы оказались достаточно эффективными. Даны прогностические рекомендации.

Показано наличие тенденции к одновременному формированию высоких уровней загрязнения воздуха в городах заданного региона.

Ключевые слова: экстремально высокий уровень загрязнения воздуха, прогноз загрязнения воздуха, концентрация примесей, метеорологические условия, синоптические ситуации.

Табл. 2. Ил. 1. Библ. 13.

УДК 551.55

Исследование климатических ресурсов энергии ветра в нижнем 200-метровом слое атмосферы над территорией Ленинградской области. Борисенко М. М., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 104—114.

Впервые в практике отечественных исследований на основе использования результатов длительных судовых измерений скорости ветра с помощью оригинальной методики построена карта районирования Ленинградской области и восточной части Финского залива по значениям ветроэнергетического потенциала на уровне 200 м. Установлено наличие тесной корреляционной связи ($r \geq 0,95$) между скоростью ветра у поверхности Земли и потенциалом ветровой энергии на уровне 200 м. Определены значения потенциала ветровой энергии для 20 наиболее перспективных участков Финского залива в слое атмосферы от 10 до 200 м и сформулированы рекомендации по размещению ВЭУ мегаваттного класса. Выявлены закономерности долгопериодных временных колебаний ветроэнергетического потенциала на акватории залива и на суше Ленинградской области.

Ключевые слова: климатические ресурсы, ветроэнергетический потенциал, долгопериодные временные колебания, карта ветроэнергетического потенциала.

Табл. 2. Ил. 6. Библ. 14.

УДК 551.52.521

Оценка влияния ожидаемого к середине XXI века изменения климата на потенциал гидроэнергетики (на примере Архангельской области). Акентьева Е. М., Иванова Е. В. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 115—123.

Проведена оценка потенциала малой гидроэнергетики и его вероятного изменения в связи с изменением климата к середине XXI века на примере расчета различных категорий гидроэнергетического потенциала Архангельской области. Для анализа были привлечены данные о величине стока как разности между осадками и испарением по ансамблю 16 моделей МОЦАО, полученные в ГГО.

Ключевые слова: малая гидроэнергетика, сток, изменение климата, климатические модели.

Табл. 3. Ил. 3. Библ. 7.

УДК 551.521.31

Поступление суммарной солнечной радиации на приемные поверхности гелиоустановок на территории России. Стадник В. В., Псаломщикова Л. М., Трофимова О. В., Шанина И. Н. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 124—137.

Рассматриваются закономерности облучения суммарной солнечной радиацией наклонных поверхностей. Приводятся карты распределения по территории России годовых сумм суммарной радиации на поверхности, следящие за Солнцем и с углом наклона, равным широте места. Анализируется годовой ход суточных сумм суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности. Приводятся карты средних суточных сумм радиации на наклонные поверхности в месяц максимального прихода при средней облачности.

Ключевые слова: суммарная солнечная радиация, наклонные поверхности, гелиоустановки, карты средних суточных сумм радиации.

Табл. 3. Ил. 4. Библ. 7.

УДК 551.58

Климатические ресурсы низкопотенциального тепла земли, доставляемого тепловыми насосами. Смирнов Д. В. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 138—144.

Одним из источников возобновляемой энергии является низкопотенциальное тепло грунта, реализуемое с помощью тепловых насосов. По данным о теплопотерях стандартного здания при преобладающих на территории Российской Федерации зимних температурах воздуха (-11 и -22 °С) выбран тепловой насос мощностью 10,6 кВт. Составлены карты многолетнего среднегодового числа дней с данными температурами. Выполнен анализ полученных карт. В области, благоприятной для функционирования тепловых насосов, число дней с температурами -11 и -22 °С возрастает в направлении с запада на восток. Повторяемость указанных температур использована для расчета доли энергии низкопотенциального тепла по отношению к величине всей потребляемой энергии, которая составляет 70 % на юго-востоке азиатской части России и 98 % на юго-западе европейской части России.

Ключевые слова: тепловые насосы, климатические ресурсы, низкопотенциальное тепло земли.

Табл. 2. Ил. 5. Библ. 8.

УДК 551.584

Систематизация метеорологических станций по условиям местоположения с помощью метода кластерного анализа. Зиновьева Н. А., Пигольцина Г. Б. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 145—153.

Предложена методика объективной систематизации метеорологических станций по местоположениям в условиях сложного рельефа с помощью метода кластерного анализа. Показана возможность использования результатов кластерного анализа для формализации некоторых закономерностей микроклиматической изменчивости.

Методы использованы для микроклиматического описания и районирования территории проведения зимних Олимпийских игр «Сочи-2014».

Ключевые слова: кластерный анализ, местоположение метеорологических станций, формализация микроклиматических методов расчета.

Табл. 2. Ил. 2. Библ. 6.

УДК 551.501.721

Возможные аспекты использования формулы Сивкова. Морозова И. В. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 154—163.

Цель работы — оценить возможность использования известной формулы Сивкова применительно ко всей территории земного шара. Для проведения исследования были привлечены данные многолетних наблюдений мировой радиометрической сети по суммарной солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния, накопленные в Мировом центре радиационных данных (Россия, СПб., МЦРД).

Результаты исследования получили практическое применение — они были использованы автором при разработке алгоритма автоматизированного контроля радиационных данных, поступающих в МЦРД с мировой радиометрической сети.

Ключевые слова: формула Сивкова, мировая радиометрическая сеть, суммарная солнечная радиация, продолжительность солнечного сияния.

Табл. 3. Ил. 2. Библ. 6.

УДК 551.501

Исследование химических процессов в атмосфере по данным мониторинга в городах. Безуглая Э. Ю., Воробьева И. А., Полуэктова М. А. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 164—184.

На основании данных рутинных наблюдений в городах показана возможность оценки уровней загрязнения воздуха газовыми компонентами (O_3 , NO , NO_2 и $НСНО$) с использованием классических химических уравнений. Рассмотрены зависимости между концентрациями указанных веществ. Исследована тенденция изменения концентраций формальдегида и подтвержден сделанный ранее вывод об увеличении химической активности атмосферы над территорией России.

Ключевые слова: оценки уровня загрязнения воздуха, газовые компоненты, химические уравнения, химическая активность атмосферы.

Табл. 1. Ил. 13. Библ. 8.

УДК 551.508

Оптимальное управление состоянием парка метеорологических средств измерений. Окоренков В. Ю. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 185—193.

Выполнен краткий анализ современного состояния систем анализа и управления состоянием средств измерений. Приведены результаты и эффективность внедрения в системе Росгидромета разработанной ГУ «ГГО» автоматизированной системы управления состоянием парка метеорологических средств измерений (АСУ «STATUS-SI»).

Показаны направления дальнейшего совершенствования систем анализа и управления состоянием парков средств измерений в системе Росгидромета на базе автоматизированных систем проверки мобильных автоматизированных поверочных лабораторий МАПЛ-1.

Ключевые слова: средства измерений, система анализа и контроля, состояние парка метеорологических средств измерений.

Библ. 8.

УДК 551.508

Метрологическая надежность метеорологических информационно-измерительных систем. Окоренков В. Ю. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 194—212.

Изложены результаты исследований метрологической надежности аэродромных и сетевых автоматизированных метеорологических информационно-измерительных систем и комплексов, эксплуатируемых и внедряемых в системе Росгидромета. Приведены оценки основных показателей метрологической надежности, позволяющие обосновать оптимальные по критериям надежности межповерочные интервалы.

Ключевые слова: метрологическая надежность, метеорологические информационно-измерительные системы, межповерочные интервалы.

Ил. 1. Библ. 21.

УДК 551.58.001.57

Пространственное распределение размеров ледяных частиц у верхней кромки урагана. Кохановский А. А. Труды ГГО. 2010. Вып. 560. С. 213—222.

Найдено пространственное распределение размеров частиц урагана «Катрина» по данным MODIS/TERRA (24—29 августа 2005 г.). Существует явная тенденция изменения пространственного распределения микрофизических свойств урагана при удалении от центра. Получены сравнительно небольшие значения эффективного диаметра кристаллов льда в непосредственной близости от центра урагана. Это согласуется с гипотезой гомогенной нуклеации, обусловленной сильными восходящими вертикальными потоками вблизи центра урагана.

Ключевые слова: ураган, кристаллы льда, распределение частиц по размерам.

Ил. 3. Библ. 9.

УДК 551.576

Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой. Щукин Г. Г., Степаненко В. Д., Снегуров А. В. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 223—241.

Представлены виды активно-пассивной радиолокационной метеорологической информации, получаемой в настоящее время в интересах различных потребителей. Обсуждается развитие радиометеорологической сети на основе отечественных доплеровских радиолокаторов с поляризационной селекцией сигнала. Представлены результаты и перспективы применения пассивной метеорадиолокации и ее комплексирования с МРЛ для оценки обледенения летательных аппаратов, грозоопасности облаков, контроля активных воздействий на облака. На экспериментальном материале продемонстрирована перспективность совместного применения МРЛ и грозопеленгаторов для повышения эффективности оценки молниевой активности облаков.

Рассмотрено применение радиолокационных профиломеров для определения ветра на высотах для обеспечения пуска ракет и космических кораблей.

Отмечена тенденция по созданию отечественных малогабаритных метеорологических радиолокаторов. Для применения в синоптическом сверхкраткосрочном прогнозе погоды осуществляется комплексирование радиолокационной информации с данными ИСЗ и наземной метеорологической сети.

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор, пассивно-активные радиолокационные системы, грозоопасность, турбулентность, обледенение, профиломер, грозопеленгатор.

Табл. 1. Ил. 11. Библ. 4.

УДК 551.576.2:551.583.1

Исследование фазового состояния внутримассовой и фронтальной облачности над Северо-Западным регионом России применительно к проблеме активных воздействий. Доронин А. П., Белевич М. Ю., Козлов В. Н., Кильчанский Е. Е., Шереметьев Р. В. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 242—265.

Выполнены исследования фазовой структуры внутримассовой и фронтальной слоистообразной облачности с целью искусственного регулирования осадков в теплый и холодный период года. Используются данные около 8000 подъемов самолетов-зондировщиков атмосферы, оснащенных специальным оборудованием, за период 1953—1964 гг. Показано, что облачные системы являются переохлажденными (капельно-жидкими) или смешанными летом и зимой в 95—100 % случаев. Кристаллическая фаза отмечается в единичных случаях (не более 2 %).

На основании исследований фазовой структуры зимних облаков дается обоснование возможности использования традиционных реагентов (твердая углекислота, жидкий азот, йодистое серебро и др.) для предотвращения (изменения интенсивности) зимних снегопадов, причиняющих значительный ущерб коммунальному хозяйству мегаполисов и транспортным магистралям. Введение небольшого количества реагентов способствует изменению фазового состояния облаков. Это позволяет проводить активные воздействия на внутримассовые и фронтальные облачные системы с целью искусственного регулирования осадков в течение всего календарного года.

Ключевые слова: активные воздействия, фазовая структура облаков, реагенты, неустойчивость облачных систем.

Табл. 6. Ил. 4. Библ. 37.

УДК 551.508.95; 551.510.41

Газохроматографические измерения концентрации водорода в атмосферном воздухе. Привалов В. И., Парамонова Н. Н. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 266—275.

В ГГО создана газохроматографическая установка для измерения концентрации водорода в атмосферном воздухе на базе российского хроматографа Кристалл 5000.2 с использованием импульсного газоразрядного детектора, обладающего высокой степенью линейности в широком диапазоне измеряемых концентраций. Дано описание метода калибровки и тестирования аппаратуры. Случайная погрешность измерений не превышает 1 %, что соответствует нормам ВМО. Установка имеет систему контроля качества измерений.

По результатам измерений, выполненных на станции Воейково (пригород Санкт-Петербурга), показано существенное влияние антропогенных источников на концентрацию водорода в атмосферном воздухе.

Ключевые слова: газовая хроматография, атмосферный водород, парниковые газы.

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 5.

УДК 551.586

Очень сильные морозы на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа. Грищенко И. В. Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 276—284.

Приводятся результаты обработки климатической информации по сильным морозам на территории Архангельской области и НАО. Получены среднее число дней с ОЯП, распределение ОЯП по территории и по сезонам, тенденция в межгодовой изменчивости. Рассмотрены циркуляционные и синоптические условия возникновения сильных морозов.

Ключевые слова: сильные морозы, циркуляционные и синоптические условия, опасные явления погоды.

Ил. 7. Библ. 4.

УДК 551.58:551.509.3

On prevention of global warming through dispersion of sulfate aerosols in the stratosphere. Meleshko V. P., Kattsov V. M., Karol I. L. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 7—27.

Numerous studies show that global climate warming due to increase of greenhouse gases may cause substantial impact on environment in the forthcoming decades. To reduce or prevent possible negative consequences of such warming, the both technologies of reduction emission of greenhouse gases and deliberate climate forcing are widely discussed including its governance. The current studies aimed at assessment of impact of simultaneous CO₂ increase and stratospheric aerosols emission on global and regional climate, ozone layer, and ocean oxidation are discussed in the paper. It is pointed out that creation and subsequent maintenance of artificial aerosols layer in the stratosphere can stop or delay the global warming, but it will also result in decrease of global precipitation, particularly noticeable in the tropical zone. Furthermore, setting up of aerosol screen in stratosphere does not resolve the issue of CO₂ increase in the atmosphere that brings to further oxidation of the ocean, in its turn, and will have harmful consequences for marine biosphere. As striking example of insufficiently considered human intervention in the environment with intention of its more efficient utilization may be considered grievous fate of Aral sea that seriously affected social and economic life of countries in Central Asia. Majority of scientific community all over the world expresses great concern about possible large scale implementation of intentional influence upon climate system. Political and ethical issues relevant to intentional interference of the human with the natural environment are also discussed.

Keywords: global climate warming, sulfate aerosols, greenhouse gases.

Ref. 10.

УДК 551.581, 551.583

On combining climate models in ensembles. Genikhovich E., Pavlova T., Kattsov V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 28—46.

An original approach to data assimilating and combining the climate models projections in multi-model ensembles has been developed. It is based on the techniques of approximation and regularization of multidimensional vectors in the linear Euclidean space with the use of the non-orthogonal vector basis. As a result, just a subset of the models included in the ensemble is sufficient for reconstructing the long-term variations of the modeled characteristics.

The approach was successfully tested using the data series of the annual temperatures averaged over the Globe and Northern Hemisphere corresponding to the last 100 years. These data were generated using the ensemble of 17 climate models. The efficiency of the developed method was confirmed by comparison of the results obtained against the historical data set known as HadCRUT3. It was shown in particular that the rms errors of simulation of the mean global temperatures were reduced 4 to 14 times for non-filtered and filtered time series correspondingly as compared with the “standard” ensemble-averaged estimates. For the temperature anomalies, such a reduction was around 2 to 4 times.

The results obtained indicate that the number of models included in an ensemble could be excessive. It could be attributed to the fact that the time series generated by different models in the ensemble may be comparatively closely correlated. The developed method seems to be promising in reducing uncertainties of the climate projections for the 21st century.

Keywords: climate models, ensemble, multidimensional vector, approximation, regularization.

Tab. 1. Fig. 3. Ref. 36.

УДК 551.581, 551.583

Discrimination of climate models, probabilistic approach. Bekryaev R. V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 47—66.

Methodology of climatic models discrimination based of probabilistic approach is presented. The method consists of the testing of specific climatic characteristics via their statistical comparison with the estimates obtained from the analysis of observational data. We propose the routine procedure of sample variance, spectral density, sample mean and linear trend analysis. The methodology allows taking into account the autocorrelation in the modeled and observationally based time series. We applied the methodology to CMIP3 numerical simulation outputs analysis. The statistical testing was successful for the models echam, echo и hadcm3.

Keywords: models, random processes, discrimination, autocorrelation.

Fig. 7. Ref. 6.

УДК 551.465

The estimate of the one-dimensional model applicabilty to the upper quasi-homogeneous layer in World Ocean key regions. Bortkovski R. S., Egorov B. N. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 67—83.

The problem of gas exchange between air and ocean is far from final solution up to now. Modern estimates of the climatic gas exchange are based on diffusive formulae. The gas flux is found there as a product of “gas exchange velocity”, the quantity depending on wind speed, to concentration difference between the very sea surface and the subsurface water layer. Besides it is implicitly assumed that the difference doesn't depend on the wind speed, and that it has a constant value. However this approach seems correct not at the moderate wind only, but more of it at the unchanging conditions in the upper ocean layer. At such serious variations as the observed Southern Oscillation manifestations the approach is hardly applicable. That's why here is used the new version of the numerical model which was applied before to solve various problems. It is shown that the applicability of one-dimensional models is defensible in cases when vertical influxes of transferred substances are significantly greater than the horizontal ones.

Keywords: one-dimensional model, gas exchange, the upper quasi-homogeneous layer.

Tab. 7. Fig. 3. Ref. 17.

УДК 551.510.04

On estimation of efficiency of different chemical mechanisms used for modeling of transformation of atmospheric pollutants. Mekruykova E. V., Genikhovich E. L. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 84—91.

The efficiency of different (photo)chemical mechanisms and models is analyzed in this paper. The models are represented by the set of taken into account chemical reactions and corresponding reaction rates. The results of calculations with the use of these models should be compared with data of measurements in smog chambers. The method of comparison of efficiency estimates of different models is introduced in this paper. Using the data of laboratory experiments carried out at the University of California the quantitative efficiency estimates are presented here for three sets of chemical reactions selected from publications.

The results obtained could be used for selection of chemical mechanisms appropriate in solution of problems of atmospheric chemistry.

Keywords: modeling, transformation of pollutants, chemical mechanism, efficiency estimate, smog chambers.

Tab. 1. Fig. 1. Ref. 17.

УДК 551.510.42

The forecast of extremely high levels of air pollution in the cities of the industrial region. Kostareva T. V., Kirillova V. I., Nikolaev V. D., Sonkin L. R. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 92—103.

The problem of the forecast of extremely high levels of air pollution (EHLAP) for the cities of the industrial region is examined. The forecast for each city of the given region, including the cities where there are not enough data for working out of synoptical-statistical schemes of the forecast, and also an estimation of an expected air pollution condition as a whole in this region are considered. It is shown that the character of the influence of the synoptic conditions on air pollution level in the cities within the given region is approximately identical. In this connection for each city of the region the same synoptic governing parameter (“predictor”) Sn can be accepted. For validation of this approach the synoptical-statistical schemes of the EHLAP forecast have been developed for the group of the neighboring cities using the same predictor Sn . All the schemes have sufficiently effective. Recommendations for the forecast are given.

The occurrence of the tendency to simultaneous formation of the high levels of the air pollution in the cities of the given region is shown.

Keywords: extremely high level of air pollution, the forecast of air pollution, concentration of pollutants, weather conditions, synoptic situations.

Tab. 6. Fig. 4. Ref. 38.

УДК 551.55

Wind energy climatic resource investigations at lower 200 m atmosphere layer over Leningrad oblast. Borisenko M. M., Gobarova E. O., Zhiltsova E. L. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 104—114.

For the first time in domestic research based on long-term slip's wind speed measurement by means of original technique a zoning map of wind energy potential values at 200 m level for Leningrad oblast and eastern part of Finnish bay was drawn. A close correlation link ($r \geq 0,95$) between wind speeds at the ground level and wind energy potential at 200 m level was determined. Wind energy potential values for 20 of most promising Finnish bay areas for 10—200 m atmospheric level were determined. Recommendations for megawatt class wind power plant placement are stated. Long period temporal wind energy potential oscillations in bay basin and Leningrad oblast terrain were detected.

Keywords: climatic resource, wind energy potential, long period temporal, map of wind energy potential.

Tab. 2. Fig. 6. Ref. 14.

УДК 551.52.521

The impact of expected climate change on mini hydroenergetics potential by the middle of 21th century (the Arkhangelsk Region case study). Akentyeva E. M., Ivanova E. V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 115—123.

The impact of expected climate change on potential of minihydroenergetics in Arkhangelsk Region by the middle of the 21 century was assessed using ensemble data of 16 GCMs. Various types of potential were evaluated taking in the account runoff data calculated as a difference between precipitation and evaporation sums in the Department of Dynamic Meteorology in GGO. Economic assessment is included in potential analyses.

Keywords: minihydroenergetics, runoff, climate change, climate models.

Tab.3. Fig. 2. Ref. 6.

УДК 551.521.31

Solar radiation income on receiving surfaces of heliosystems over the russian territory. Stadnik V. V., Psalomshicova L. M., Trofimova O. V., Shani-na I. N. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 124—137.

The work considers regularities of global solar radiation income on inclined surfaces. The maps of annual totals of incoming global radiation on the surfaces facing the sun and on the surfaces inclined through the angle equaling the latitude of observation site are presented. The annual distribution of daily global radiation totals on inclined surfaces has been analyzed. The maps of average daily totals of global radiation on inclined surfaces in the month of maximum income under condition of average cloudiness are included in the work.

Keywords: global solar radiation, inclined surfaces, heliosystems, maps of average daily totals of global radiation.

Tab. 3. Fig. 4. Ref. 7.

УДК 551.58

Climatic resources of low-potential geothermal heating supplied by thermal pumps. Smirnov D. V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 138—144.

Low-potential heat of the earth bringing by thermal pumps is one of the source of renewable energy resources. From the data of heat loss of standard building and winter temperature (-11 and -22 °C) on the territory of the Russian Federation there were chosen the heat pump with heat capacity 10,6 kWt. Maps of long-term mid-annual number of days were created and the analysis of the founding's was also performed. The favorable conditions for the better functionality of heat pumps and the number of days with temperatures of -11 and -22 °C increases from the West to the East. Iteration of temperature data used for calculation of energy portion of low-potential heat in relationship to amount of total energy consumption. Such energy portion equals to 70 % on South-East ATR and 98 % on South-West ETR.

Keywords: thermal pumps, climatic resources, low-potential heat of the earth.

Tabl. 2. Fig. 5. Ref. 8.

УДК 551.584

Locality systematization of meteorological stations involved method of cluster analyzes. Zinovyeva N. A., Pigoltsina G. B. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 145—153.

The methodology of the objective systematization in the complicated surface conditions according to station locality is presented. For this purpose method of cluster analyzes was involved. Capability of cluster analyzes results for formalization of some peculiarities of microclimatic variability is shown.

These methods are applied for microclimatic description and zoning of the site of the Olympic Games «Sochi-2014».

Keywords: cluster analyzes, meteorological stations locality, formalization of calculating microclimatic methods.

Tab. 2. Fig. 2. Ref. 6.

УДК 551.501.721

Possible aspects of using Sivkov formula. Morozova I. V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 154—163.

The aim of the study discussed in this paper is to estimate the possibility of using the well-known Sivkov formula as applied to the whole territory of the Globe. To carry out the above study, there were used the data of long-term observations of global solar radiation and sunshine duration at the world radiometric network which were accumulated at the World Radiation Data Center (Russia, SPb, WRDC).

The study results have been used in practice — the author used them for developing the algorithm of automated checking procedure for radiation data sent to the WRDC from the world radiometric network.

Keywords: Sivkov formula, world radiometric network, global radiation, sunshine duration.

Tab. 3. Fig. 2. Ref. 6.

УДК 551.501

Study of chemical processes in the atmosphere using the urban monitoring data. Bezuglaya E. Yu., Vorobyeva I. A., Poluektova M. V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 164—184.

Based on the urban routine observation results, the possibility of estimating the air pollution levels by gas components (O_3 , NO, NO_2 and HCHO) is shown using the classical chemical equations. The relationships between the concentrations of the above matters have been examined. The trend of formaldehyde concentrations has been studied and the earlier conclusion on the atmosphere chemical activity over the Russia territory has been confirmed.

Keywords: estimating the air pollution, gas components, chemical equations, the atmosphere chemical activity.

Tab. 1. Fig. 13. Ref. 8.

УДК 551.508

Optimal control of the state of meteorological measurement instrumentation base. Okorenkov V. Yu. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 185—193.

There has been made a brief analysis of the systems for analysis and control of the measurement instrumentation state. The paper presents the results and efficiency of introducing in the Roshidromet of the automatic system developed by MGO for control of the state of meteorological measurement instrumentation base (ASC “STATUS-SI”).

The directions are shown for further improvement of the systems for analysis and control of the state of measurement instrumentation bases in the Rosgidromet system on the basis of automatic calibration systems for mobile automatic testing laboratories MATL-1.

Keywords: instrumentation, the systems for analysis and control, the state of meteorological measurement instrumentation base.

Ref. 8.

УДК 551.508

The metrological reliability of meteorological information-measurement systems. Okorenkov V. Yu. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 194—212.

The paper presents the results of studying the metrological reliability of airfield and network automatic meteorological information-measurement systems and complexes operated and introduced in the Roshidromet system. There are given estimations of the basic indices of metrological reliability which enable validating the calibration intervals optimal with regard to reliability criteria.

Keywords: the metrological reliability, meteorological information-measurement systems.

Fig. 1. Ref. 21.

УДК 551.58.001.57

Spatial features in the size distributions of the ice particles in the top of a hurricane. Kokhanovsky A. A. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 213—222.

The spatial distributions of particle absorption lengths (effective sizes), in Hurricane Katrina as derived from MODIS/TERRA measurements for several stages of the storm development (August 24—29th, 2005) are considered. The largest crystals existed at the very first stage of the hurricane development, when it was getting organized. There is the enhancing tendency for the increasing in the size of particles along with the distance from the hurricane center. The temporal behavior of spatial distributions of cloud microphysical properties as derived from the analysis of MODIS imagery is studied in detail. The derived comparatively small values of effective diameters of ice crystals in the vicinity of the hurricane center are consistent with the hypothesis of homogeneous nucleation processes taken place in a hurricane, which is due to strong vertical updrafts.

Keywords: hurricane, ice crystals, size distribution of ice particles.

Fig. 3. Ref. 9.

УДК 551.576

Advanced tendencies of radar observations on atmosphere. Shchukin G. G., Stepanenko V. D., Snegurov A. V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 223—241.

Types of complexed passive and active radar weather information obtained for the benefit of different consumers at present are presented. The development of meteorological network based on domestic polarized selection Doppler weather radar is reviewed. The results and prospects of passive radar use in complex with weather radar for estimation of aircraft ice covering, cloud lightning risk, cloud active coercion control are presented. The prospect of common use of weather radars and lightning detectors for cloud lightning activity efficiency increase are presented based on experimental results.

The use of radar profilers for wind detection on rocket and spacecraft launch heights provision is examined.

A tendency for development of compact domestic weather radar is noted. For use in nowcasting a complexing of both radar and satellite data and terran weather network data is used.

Keywords: weather radar, combined active and passive radar systems, lightning risk, turbulence, ice covering, profiler, lightning detector.

Tabl. 1. Fig. 11. Ref. 4.

УДК 551.576.2:551.583.1

Research into the condition of air-mass frontal layered cloudiness above the North-West region of Russia in respect to the problem of active modifications of clouds. Doronin A. P., Belevich M. U., Kozlov V. N., Kilchanskiy E. E., Sheremyetiev R. V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 242—265.

The research of the phase structure of air-mass and frontal layered cloudiness aimed at artificial precipitation control during both warm and cold season of the year is completed. The results are based on the data, collected during 8000 flights of meteorological reconnaissance aircrafts, equipped with special devices, within the period from 1953 till 1964. It is shown that nephystems are either overchilled (liquid-drop) or mixed in winter and in summer, repeating in 95—100 %. The crystalline phase is marked in single occasions reaching only 2 %.

The research of the phase structure of winter clouds provides the ground for substantiation of the possibility of using traditional reagents (solidified carbon dioxide, liquid nitrogen, silver iodide etc.) in order to prevent (change intensiveness) of winter snowfalls that effect public services of megacities and cause damage to traffic lines. Introduction of a small amount of reagents facilitates changing of the phase condition of clouds. That allows to perform active modifications of air-mass and frontal nephystems aimed at artificial precipitation control during the entire calendar year.

Keywords: active modifications of clouds, phase structure of clouds, reagents, nephystem instability.

Tab. 6. Fig. 4. Ref. 37.

УДК 551.508.95; 551.510.41

Gas chromatographic system for the analyses of hydrogen in the atmosphere. Privalov V. I., Paramonova N. N. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 266—275.

Gas chromatographic system for the analyses of hydrogen in the atmosphere was set up by MGO on the base of Russian made GC “Kristall 5000.2” with linear in wide range of measured concentration Pulsed Discharge Detector. Method of calibration and equipment testing is described. Random error of measurements not exceeds 1 % in accordance with WMO recommendations. The GC has quality control system.

Significant influence of anthropogenic sources to atmospheric hydrogen concentration was shown on the base of measurements at Voeikovo station (suburbs of Saint-Petersburg).

Keywords: gas chromatography, atmospheric hydrogen, greenhouse gases.

Tab. 1. Fig. 5. Ref. 5.

УДК 551.586

Severe frosts on the territory of the Archangelsk and Nenecky Region. Gri-
eshenko I. V. Proceedings of MGO. 2010. V. 561. P. 276—284.

The results of the information processing of severe frosts on the territory of the Archangelsk and Nenecky Region are presented. The following climate parameters are calculated: average number of days with dangerous weather events, distribution of severe frosts on the territory and during seasons, temporal tendency. The circulation and synoptic conditions of the formation of severe frosts are considered.

Keywords: severe frosts, circulation and synoptic conditions, dangerous weather events.

Fig. 7. Ref. 4.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

*Индекс 18617
по каталогу Роспечати
«Газеты. Журналы»*