

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск
565

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

Санкт-Петербург
2012

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

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,
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.

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

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

Editorial board

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

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

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

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

ISSN 0376-1274

© Государственное учреждение «Главная
геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова»,
2012

СОДЕРЖАНИЕ

<i>М. А. Салль.</i> Финансы и климатические риски	7
<i>Н. В. Кобышева, Н. А. Кобышев.</i> Экономическое обоснование выбора возобновляемых источников энергии (на примере Дальневосточного региона России)	22
<i>Е. Л. Генихович, И. Г. Грачева, В. А. Ионин, Р. И. Оникул, Д. Ю. Румянцев, Е. Н. Филатова, Е. А. Яковлева.</i> Моделирование характеристик загрязнения воздуха атмосферными аэрозолями для практических приложений	49
<i>Е. Л. Генихович, А. В. Киселев, И. В. Смирнова, С. С. Чичерин.</i> К анализу последствий высокого загрязнения воздушного бассейна Москвы летом 2010 г.	79
<i>Э. Ю. Безуглая, М. С. Загайнова, Т. П. Ивлева.</i> Возможность оценки высоких концентраций формальдегида при изменении температуры воздуха	89
<i>А. Д. Зив.</i> Моделирование асинхронности выбросов источников с помощью дискретных случайных величин	103
<i>О. М. Покровский.</i> Климатология облачности по результатам международного спутникового проекта	115
<i>В. Н. Павлова, О. Д. Сиротенко.</i> Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России	132
<i>Е. К. Зюидзе, О. И. Задорнова, Т. В. Хомякова.</i> Опыт агроклиматического и оперативного мониторинга засухливых явлений в России по наземным данным	152
<i>Е. А. Черенкова, Н. К. Кононова.</i> Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории европейской части России	165
<i>Е. А. Самукова.</i> Тенденции временных изменений суммарной солнечной радиации в Европе	188
<i>В. Н. Морозов.</i> Распределение электрического поля, создаваемого ионосферным генератором, в нижних слоях атмосферы.....	205
<i>В. Н. Козлов, В. В. Клинго.</i> Теоретическое обоснование генерации заряженного гигроскопического реагента для искусственного вызывания осадков из облаков	216

<i>А. С. Горбатовская, Е. В. Дорофеев, И. Б. Попов, И. А. Тарабукин.</i> Опытная эксплуатация образца ДМРЛ-С на Валдае и анализ результатов количественной статистической оценки оправдываемости распознавания гроз на основе сопоставления с данными наземной наблюдательной сети и спутниковой информацией	232
<i>Е. В. Дорофеев, А. Е. Дроздов, И. А. Тарабукин, А. Ф. Мирончук, В. Ю. Шаромов.</i> Особенности комплексирования разнородной метеорологической информации для обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов в комплексной автоматизированной информационно-измерительной системе гидрометеорологического обеспечения безопасности полетов авиации ВМФ КАСМЕТЕО-К....	246
<i>С. М. Персин, Л. В. Анискин, Д. Н. Медведев.</i> Состояние и тенденции развития аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем.....	257
<i>В. М. Ивахов, А. В. Зинченко.</i> Определение наиболее репрезентативных обратных траекторий в зависимости от выбора вертикальной координаты	263
<i>Б. Л. Кожевников.</i> О расчете нагрузок экстремальных температур воздуха на технику.....	278
Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы	286
Роман Семенович Бортковский	289
Камиль Шейхович Хайруллин	292
Роберт Алексеевич Круглов	294
Соломон Меерович Персин.....	296
Памяти Льва Рахмиловича Сонькина.....	298

CONTENTS

<i>M. A. Sall.</i> Finances and climatic risks	7
<i>N. V. Kobysheva, N. A. Kobyshev.</i> Economic justification of renewable energy source selection	22
<i>E. L. Genikhovich, I. G. Gracheva, V. A. Ionin, R. I. Onikul, D. A. Rumyantsev, E. N. Filatova, E. A. Yakovleva.</i> Characteristics of the aerosol atmospheric pollution: modeling for practical applications	49
<i>E. Genikhovich, A. Kiselev, I. Smirnova, S. Chicherin.</i> On analysis of consequences of episodes of high atmospheric pollution in Moscow in summer 2010	79
<i>E. Y. Bezuglaya, M. S. Zagainova, T. P. Ivleva.</i> Possibility of assessment of high concentrations of formaldehyde at changes in air temperature	89
<i>A. D. Ziv.</i> The discrete random variable model of the source emissions asynchronicity	103
<i>O. M. Pokrovsky.</i> The cloudiness climatology research based on the International Satellite Cloud Climatology Project Data.....	115
<i>V. N. Pavlova, O. D. Sirotenko.</i> Observed climate trends and dynamics of Russian agriculture productivity	132
<i>E. Zoidze, O. Zadornova, T. Khomyakova.</i> Practice agroclimatic and operational monitoring drought events in Russia on ground data	152
<i>E. Cherenkova, N. Kononova.</i> Analysis of a severe atmospheric drought in 1972 and 2010 and macrocirculation conditions of its formation over the european part of Russia.....	165
<i>E. A. Samukova.</i> Evaluation of long-term changes of global solar radiation in Europe.....	188
<i>V. N. Morozov.</i> The distribution of electric field made by ionosphere electrical generator in lower atmosphere.....	205
<i>V. N. Kozlov, V. V. Klingo.</i> Theoretical basis for artificial precipitation from the clouds, charged with hygroscopic reagents	216
<i>A. S. Gorbatovskaya, E. V. Dorofeev, I. B. Popov, I. A. Tarabukin.</i> Operation testing of sample DMRL-C on a position Valdai and the analysis of comparison radar data about dangerous weather events with surface observations and satellite information	232

<i>E. V. Dorofeev, A. E. Drozdov, I. A. Tarabukin, A. F. Mironchuk, V. Y. Sharomov.</i> Features of interconnecting heterogeneous meteorological information to ensure the safety of aircraft in a complex automated information-measuring system of hydrometeorological safety of naval aviation “KASMETEO-K”	246
<i>S. Persin, L. Aniskin, D. Medvedev.</i> Current state and trends in development of the Aerodrome Meteorological Information and Measurement Systems	257
<i>V. M. Ivakhov, A. V. Zinchenko.</i> Determination of the most representative backwards trajectories depending on its specified arrival heights	263
<i>B. L. Kozhevnikov.</i> About the load on the technical equipment of extreme air temperatures.....	278
Russian Conference on cloud physics and hydrometeorological processes modifications	286
Roman S. Bortkovsky.....	289
Kamil Sh. Hyrullin	292
Robert Al. Kruglov.....	294
Solomon M. Persin.....	296
In memory L.R. Sonkin	298

УДК 551.5+327+339

ФИНАНСЫ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ РИСКИ

М. А. Салль

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

Поступила в редакцию 10.02.2012
Поступила после доработки 21.03.2012

1. Введение

Настоящая работа представляет собой дополнение к Докладу (Оценка макроэкономических последствий..., 2010), посвященному макроэкономическим последствиям климатических изменений.

Изучая влияние климатических рисков на макроэкономику, следует понимать, что «макроэкономическая теория изучает экономическое поведение и политику, влияющую на объем потребления и инвестиций, валютные курсы и торговый баланс, а также факторы, определяющие изменение зарплат и цен, денежную и фискальную политику, объем наличной массы денег, федеральный бюджет, изменение ставки процента, государственный долг» (Дорнбуш, Фишер, 1997). Это означает что климатические риски, оказывая непосредственное воздействие на реальные секторы экономики, неизбежно сказываются на функционировании финансовой системы, к которой мы будем причислять как частные компании, занимающиеся кредитами, инвестициями, страхованием, осуществляющие лизинговые услуги и т. д., так и государственные органы в плане реализации различных программ финансирования мероприятий, направленных на адаптацию к воздействию климатических изменений на экономику и граждан непосредственно. При этом задача адаптации финансовой системы сводится не только к сохранению ее собственной устойчивости, но и к тому, что от ее надлежащего функционирования зави-

сит способность реальных секторов экономики адаптироваться к климатическим изменениям.

Целью данной обзорной работы, обобщающей материалы зарубежных источников, является выявление тех климатических вызовов и порождаемых ими проблем в сфере денежно-финансового обращения, с которыми Российская Федерация столкнется в 20-летней перспективе.

Отметим, что непосредственно климатическим рискам подвержено от 20 до 80 % экономики (в зависимости от степени индустриализации страны). Помимо этого, возникают опосредованные климатические риски, воздействующие фактически на всю экономику. В табл. 1 приведены данные из работы Lazo et al. (2011), характеризующие влияние природно-климатических изменений на отрасли экономики США. Представлены возможные колебания (%) уровня реализации в долларовом эквиваленте, обусловленные климатическими факторами. При этом авторы указанной работы не принимали в расчет возможное влияние катастрофических явлений (ураганов, торнадо и т. п.).

Еще раз подчеркнем, что данные в табл. 1 соответствуют денежному эквиваленту, а не уровню реального производства, допустим, топливного мазута в тоннах. Понятно, что в агропромышленном комплексе колебания цен, доходы и т. д. напрямую связаны с урожайностью и уровнем производства сельхозпродукции. В добывающих отраслях погодно-климатические факторы

Таблица 1

Возможные колебания уровня реализации отраслей экономики США

Отрасль	Колебания, %
Добывающие отрасли	14
Агрокомплекс	12
Производство	8
Финансы, страхование	8
ЖКХ	7
Сфера услуг	3
Оптовая и розничная торговля	2

определяют колебания цен и тем самым прибыль даже при неизменном уровне добычи, который к тому же сам по себе очень чувствителен к погодно-климатическим изменениям. Достаточно упомянуть штормы в районах шельфовой нефтедобычи, сбивающие графики забора нефти из накопителей на платформах, понижение температуры до -40°C и ниже, при которых резко возрастает число поломок техники, недостаток воды для первичной обработки руды и т.п. При этом страхование и финансы делят третье место с производством в силу того, что они теснейшим образом завязаны на добывающие отрасли и агрокомплекс. В нашей стране ситуация была бы несколько иной: ЖКХ переместился бы на более высокое место, добавились бы проблемы с инфраструктурой и строительством, однако уязвимость финансового сектора осталась бы достаточно высокой.

Обусловленные погодно-климатическими факторами общие годовые колебания экономики США могут достигать 485 млрд долл., что более чем в полтора раза превышает государственный бюджет Российской Федерации.

На рис. 1 приведены основные типы климатических рисков и те подсекторы финансового сектора, на которые в наибольшей степени оказывают влияние соответствующие типы рисков.

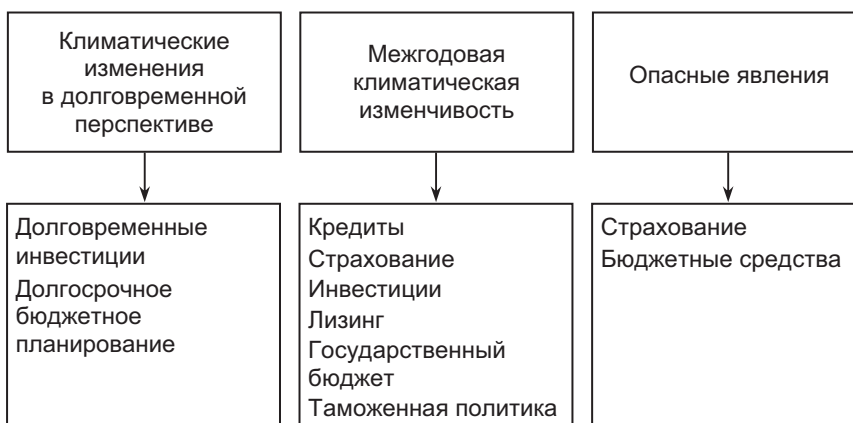


Рис. 1. Типы климатических рисков и их влияние на финансовый сектор экономики.

При этом следует разделить завязанные на климат финансовые риски на краткосрочные (до года) и долгосрочные, проблема оценки которых является составляющей финансовой политики, как государственной, так и частных структур.

Важным моментом в оценке климатических рисков является неоднозначность их финансовых последствий во временной перспективе, что определяется противоречивостью их воздействия на разные отрасли. В качестве примера можно привести гипотетическую ситуацию — внезапное прекращение торнадо в США. Производительность сельскохозяйственного сектора возрастает, цены на зерно падают, и это может привести к различным последствиям для сельхозпроизводителей и кредитных учреждений. При этом однозначным последствием будет падение производства и соответственно прибыли, к примеру, компаний, осуществляющих ремонт электропроводной сети, поставщиков изоляторов, проводов, предохранителей и так далее по технологической цепочке вплоть до добывающих компаний, а в конечном итоге для государства, взимающего плату за недра и прочие налоги. При этом в долгосрочной перспективе приведенная гипотетическая ситуация окажет, несомненно, благоприятное воздействие на экономику США.

Меры по адаптации финансовой системы к климатическим рискам могут быть соответственно разделены на меры, предпринимаемые в краткосрочной и в долгосрочной перспективе (табл. 2).

В кредитной и страховой деятельности адаптация к климатическим рискам осуществляется путем дифференциации ставок в зависимости от типа продукции, выпускаемой предприятием, а также типа залоговых активов. Это относится, в первую очередь, к предприятиям агропромышленного комплекса. Стандартным моментом является диверсификация кредитных и страховых портфелей. О механизмах хеджирования климатических рисков мы будем говорить особо. При установлении кредитных ставок банки ориентируются на имеющиеся у них данные по отраслям и регионам, т. е. учет климатических рисков происходит на базе банковской статистики по просрочке платежей и отказов погашения кредитов.

Таблица 2

Адаптационные меры финансового сектора

Вид деятельности	Краткосрочная перспектива	Долгосрочная перспектива
Кредиты	Дифференциация ставок	Выработка стратегий долгосрочного кредитования
Страхование	Диверсификация портфелей Перестраховка Хеджирование	
Инвестиции		
Бюджетные расходы	Использование резервных фондов	Создание резервных фондов
Экспортно-импортные пошлины	Временное ограничение ввоза-вывоза	Пересмотр таможенной политики

Далее будут рассмотрены различные аспекты адаптации финансового сектора в долгосрочной перспективе и в плане адаптации к опасным явлениям. Что касается межгодовых климатических изменений, то мы рассмотрим некоторые проблемы сельского хозяйства и отчасти энергетики.

2. Долгосрочная перспектива

Консалтинговая компания Mercer (<http://www.mercer.com/home>) проанализировала возможное влияние изменения климата на портфели инвесторов в ближайшие 20 лет. Исследование выполнялось по заказу группы ведущих международных инвесторов, под управлением которых находится около 2 трлн долл. США. К работе широко привлекалась Лондонская школа экономики. На основе рассмотрения четырех возможных сценариев изменения климата был проанализирован набор возможных политических и экономических мер, принимаемых как международными сообществами и правительствами стран, так и отдельными компаниями и инвесторами.

К основным результатам следует отнести грядущий резкий рост значимости инвестиционных рисков, связанных с изменени-

ем климата, в общем объеме рисков — до возможного показателя 10 % к 2030 г. При этом были посчитаны не только риски непосредственно физического ущерба в результате растущего числа природных катастроф, но и риски изменения международного и национального законодательства и регулирования, изменения в структуре производства и потребления, а также технологические сдвиги. В докладе отмечается, что российские инвесторы не принимают во внимание подобные риски, предпочитая концентрироваться на краткосрочных вызовах.

По подсчетам аналитиков, к 2030 г. общий объем ущерба окружающей среде, состоянию здоровья населения и продовольственной безопасности стран может превысить 4 трлн долл. США. В качестве адаптационных мер предлагаются изменения в инвестиционных портфелях в пользу таких технологий, как энергоэффективность, биотопливо, возобновляемая энергетика, механизмы улавливания CO₂. Общий объем вложений такого типа может возрасти к 2030 г. до 5 трлн долл. США (Коммерсант online, 2011).

Тем не менее значительному инвестиционному риску подвергаются триллионные вложения пенсионных фондов и других инвесторов. С течением времени этот риск будет принимать характер систематического, если не будет изменена структура инвестиционных портфелей.

Помимо чисто инвестиционной составляющей, процессы изменения климата должны учитываться, скажем, при выборе стратегии ипотечного кредитования, находящейся в зависимости от географического фактора. Те или иные климатические изменения могут приводить к изменению привлекательности определенных регионов с точки зрения инвестиций и как следствие с точки зрения платежеспособного спроса на недвижимость.

Необходимо отметить особую роль агропромышленного комплекса. Изменение структуры посевных площадей и соотношения растениеводство/животноводство, сопровождающее климатические изменения, определяют строительство овоще- и зернохранилищ, заводов по производству комбикормов, структуру производства сельхозтехники, проведение мелиорации/ирригации и т. д.

Существенным моментом является эффективность государственных инвестиций в инфраструктуру. Не останавливаясь на

других отраслях экономики, отметим также важность вопроса зависимости от климатических изменений вложений в энергетику, срок окупаемости которых зачастую весьма высок (строительство энергоблока АЭС может занимать до восьми лет). В Албании 98 % электроэнергии производится гидроэлектростанциями, и уже сейчас возникают проблемы, связанные с уменьшением количества осадков. В этой ситуации вопрос состоит в том, стоит ли осуществлять вложения в ремонт существующих ГЭС, заниматься их страхованием и т. п. Строительство Колымской ГЭС, которое началось в 80-х годах, было заморожено на 20 лет, возобновлено в 2011 г. и будет продолжаться еще длительное время, вызывает массу вопросов с точки зрения происходящих климатических изменений, которые не брались в расчет в то время, когда она проектировалась.

Влияние климата на госбюджет определяется не только затратами на инфраструктуру и энергетику, но и затратами на ликвидацию последствий стихийных бедствий и на поддержку сельхозпроизводителей. Климатические изменения должны учитываться при создании и расширении резервных фондов, планировании финансирования МЧС и т. д. Даже если рассматривать среднесрочное планирование бюджета (в нашей стране это три года), то учет климатической составляющей является необходимым.

3. Опасные явления

Наблюдающееся в последние десятилетия увеличение расходов, связанных с экстремальными явлениями погоды, является фактором, существенно осложняющим функционирование страхового сектора экономики. В настоящее время в США примерно одна четверть потерь приходится на застрахованные активы. Ежегодные экономические потери от таких явлений возросли в 10,3 раза — с 4 млрд долл. США в 1950-е годы до 40 млрд долл. США в 1990-е годы (все в ценах 1999 г.). В этот же период застрахованная часть этих потерь возросла с незначительного уровня до 9,2 млрд долл. США в год, а соотношение между суммами выплат и потерь от катастрофических событий сократилось

на 2/3. Примечательно, что расходы возрастают в два раза в случае включения потерь, обусловленных явлениями погоды некатастрофического характера (IPCC Third Assessment Report).

Считается, что страховой сектор экономики способен справиться с наметившимися тенденциями, хотя на практике все происходит отнюдь не просто. Катастрофические последствия урагана Катрин на юге США не только привели к тому, что страховые компании потерпели убытки, но и выявили необходимость пересмотра всей страховой политики вплоть до сворачивания деятельности по отдельным видам страхования в ряде регионов США. Следует отметить, что на данный момент баланс интересов страхователей и страховщиков достигнут не в полной мере.

Помимо убытков частных страховых компаний, вынужденные затраты США по госпрограммам достигли: по национальной программе защиты от наводнений 1 трлн долл. США (в общей сложности), по федеральной программе страхования сельхозугодий 44 млрд долл. США (в год).

В России, где рынок страховых услуг недоразвит, убытки падают на государство, что показывает пример жаркого лета 2010 г. и обусловленного жарой роста числа лесных пожаров. Фактически в роли страховщика у нас выступило государство, и соответственно опасные явления легли грузом на бюджет страны. Аналоги реализованных в США национальных программ страхования отсутствуют.

4. Специфика финансовых рисков в сельском хозяйстве

Специфика финансовых рисков в сельском хозяйстве определяется спецификой ценообразования в данной отрасли. Обусловленное погодными-климатическими факторами повышение урожайности может иметь своим последствием падение цен на сельхозпродукцию и соответственно увеличение числа фермерских хозяйств, которые парадоксальным образом потерпят убытки. При этом суммарные убытки могут как возрасти, так и уменьшиться; это же относится и к величине среднего убытка убыточного фермерского хозяйства, которая определяет вероятные про-

блемы с возвратом кредита данным хозяйством и внесением лизинговых платежей.

С точки зрения кредиторов и инвесторов любые изменения цен приводят к появлению дополнительных финансовых рисков, что является крайне нежелательным. Проблема решается на государственном уровне путем увеличения спроса за счет государственных закупок в государственный резерв и стимулирования экспорта или импорта, предоставления отсрочки по лизинговым платежам (в случае программы льготного финансирования услуг лизинга). В некоторых европейских странах существует практика ограничения производства некоторых видов сельхозпродукции путем выплаты фермерам премий за «невывращивание». В нашей стране государственная экономическая политика в этой области проводится достаточно слабо. Это подтверждается тем, что при изменении урожайности на 1 % цена меняется на 3—5 %, в то время как в европейских странах — лишь на 0,3 %.

При этом государственные меры, с одной стороны, уменьшают финансовые риски кредиторов, инвесторов и сельхозпроизводителей, с другой стороны, увеличивают бюджетные риски и требуют создания специализированных фондов, т. е. фактически замораживания финансовых ресурсов.

В ряде стран мира действуют государственные или частногосударственные программы страхования сельхозугодий. В Индии ведется аэросъемка целого региона, по результатам которой определяется плановый урожай, и в случае неурожая все застрахованные хозяйства получают компенсации.

Интересен опыт Мексики, где фермеры страхуют погодные условия по температуре и количеству осадков. Так, в табл. 3 (AGROASEMEX, см. список литературы) приведены допустимые уровни количества осадков для различных типов культур. В случае засухи или переувлажнения потери фермерам компенсируют. Отметим ячмень, который является не совсем типичной для Мексики культурой. Страхование его посевов в данном случае — способ стимулирования его выращивания и отвечает интересам государственной политики.

Таблица 3

Допустимое количество осадков по видам сельхозкультур (в Мексике)

Культура	Количество осадков, мм		
	Посевная	Вызревание	Сбор
Зерновые	29—66	49—239	18—26
Бобовые	26—58	45—107	24—128
Ячмень	35	97—140	39—52
Сорго	36—37	54—97	54—97

В России существует осуществляемая Министерством сельского хозяйства программа льготного лизинга для закупки крупной сельхозтехники, однако климатические факторы и, что особенно важно, их изменения в рамках этой программы никак не учитываются. При этом неизбежным последствием климатических изменений будут изменения в районировании сельскохозяйственных культур (Оценка макроэкономических последствий..., 2010). Кроме того, необходима система сельскохозяйственного страхования (по мексиканскому образцу), включающая в себя меры по стимулированию возделывания тех или иных культур и, что возможно, стимулированию животноводства. Все это напрямую связано с реализацией Программы продовольственной безопасности Российской Федерации и, следовательно, имеет первостепенное государственное значение.

5. Специфика хеджирования климатических рисков

Идея использования фьючерсных инструментов возникла на основе желания бизнеса обезопасить себя от возможных потерь в будущем, пожертвовав при этом частью будущей прибыли. Таким образом, фьючерсные биржи в конечном итоге выступают в качестве своего рода страховщиков, стабилизируя рынок и обеспечивая тем самым плавное развитие экономики.

В этой связи стоит упомянуть, что рынок фьючерсов и опционов на погодные параметры появился сравнительно поздно. Первые торги на Чикагской товарной бирже (Chicago Mercantile Ex-

change, CME) состоялись лишь в 1999 г. Контракты на температуру в первое время проводились только для городов США. В настоящее время продаются и покупаются температурные контракты для городов США (24 города), Канады (6), Европы (11), Азии (3), Австралии (3) и для городов США контракты на ураганы (9 городов), уровень снежных осадков (6), дождь (9). Общий объем рынка срочных контрактов оценочно составляет 11,8 млрд долл. США, из которых примерно 25 % приходятся на CME. Стандарты на контракты разрабатываются при участии Ассоциации погодного риска менеджмента (Weather Risk Management Association, WRMA).

Отметим, что цифра 11,8 млрд долл. США является крайне малой по сравнению с упоминавшимися выше возможными обусловленными климатическими изменениями колебаниями экономики США (485 млрд долл. США). При этом ориентировочно 80 % приходится на температурные контракты, что определяется потребностями энергетического и добывающего секторов экономики. Уменьшение объемов энергии потребления ведет к сокращению прибыли энергетических компаний, и, кроме того увеличивается число простаивающих мощностей. Для потребителей эта ситуация, наоборот, является выгодной. Это определяет некий баланс интересов, в силу которого одни продают, а другие покупают соответствующие контракты.

Помимо этого, на фьючерсном погодном рынке присутствуют и так называемые портфельные инвесторы, заинтересованные в снижении общего риска портфеля, что достигается путем включения в него погодных контрактов, котировки которых не коррелированы с основными активами.

Как отмечалось, контракты на температуру распространены наиболее широко. Покажем, как они реализуются. Ключевыми понятиями являются *heating degree days* (HDD) (дни с отоплением) и *cooling degree days* (CDD) (дни с охлаждением). Показатель HDD за один день определяется по формуле

$$\text{HDD} = \max\left(65 - \frac{H + L}{2}, 0\right),$$

где H и L — максимальная и минимальная температура за день ($^{\circ}\text{F}$). Значение 65°F ($18,2^{\circ}\text{C}$) принято как значение наиболее комфортной температуры.

Показатель CDD вычисляется аналогично:

$$\text{CDD} = \max\left(\frac{H + L}{2} - 65, 0\right).$$

Фьючерсные контракты на температуру заключаются следующим образом. Значения HDD или CDD рассчитываются для определенного периода времени (как правило, несколько месяцев). Разность между полученным значением и базовым уровнем, указанным в контракте, умножают на определенную сумму денег (например, 20 долл. США). Это так называемые *swap* контракты. Контракт заключается по следующей схеме: допустим известно, что при падении индекса HDD на один пункт ниже определенного уровня поставщик энергии теряет прибыль в размере определенной суммы и, следовательно, потребитель энергии экономит определенную сумму. Если HDD оказывается ниже уровня, заданного в контракте, платит потребитель, если выше — поставщик. При этом климатические риски как бы нивелируются.

В табл. 4 приведены котировки от 24.10.2011 на HDD контракты с 11.11.2011 по 12.03.2012 (по данным СМЕ).

Из таблицы видно, что наибольший интерес для участников рынка представляют контракты в городах с относительно холодным климатом, о чем свидетельствует сравнительно малая разница цен покупки и продажи.

Таблица 4

Город	Предложение	Спрос
Миннеаполис	6111	6190
Де-Мойн	5149	5231
Чикаго	5105	5181
.....
Джексонвилль, аэропорт	1275	1349
Хьюстон	1246	1311
Лос-Анжелес, центр	812	894

Первоначальная оценка контрактов производится на основе климатических моделей и долгосрочных прогнозов и в дальнейшем корректируется с учетом конкретной погоды и прогнозов.

Помимо *swap* контрактов можно купить право продажи базового актива (в нашем случае *swap* контракта) — это так называемый *put* опцион, или право покупки — *call* опцион. При этом мы платим премию, а реализуем свое право, только если это нам выгодно. Не вдаваясь в тонкости биржевой игры можно констатировать тот факт, что умелое использование всех этих инструментов позволяет существенно сократить потери от климатических рисков.

Для оценки опционов широко применяется на практике модель Блэка—Шоулза, разработчики которой были удостоены Нобелевской премии по экономике 1997 г. Эта модель дает оценку справедливой цены опционов. При этом мы должны отметить, что в случае опционов на погодно-климатические риски она работает не вполне корректно. Это и объясняет то, что опционы гораздо менее популярны, чем *swap* контракты. Далее мы попытаемся сформулировать климатическую проблему оценки опционов.

6. Климатическая проблема оценки опционов

Результирующие оценки модели Блэка—Шоулза следующие.

Пусть S — текущая цена базового актива (в нашем случае модельное значение климатического индекса), K — цена исполнения опциона (значение климатического индекса на момент срока реализации, при котором возникает право реализации опциона), r — безрисковая процентная ставка, σ — среднеквадратичное отклонение цены базового актива, t — время между заключением контракта и истечением срока его реализации,

$$N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{\tau^2}{2}} d\tau,$$

$$d_1 = \frac{\ln \frac{S}{K} + \left(r + \frac{\sigma^2}{2} \right) t}{\sigma \sqrt{t}}, \quad d_2 = d_1 - \sigma \sqrt{t}.$$

Тогда так называемая справедливая цена *call* опциона будет равна

$$C = SN(d_1) - Ke^{-rt} N(d_2),$$

а справедливая цена *put* опциона составит

$$P = Ke^{-rt} N(-d_2) - SN(-d_1).$$

Под справедливостью цены здесь понимается ситуация, в которой сделка с опционом оказывается одинаково выгодной как покупателю, так и продавцу. Данная модель строилась в предположении стационарности процесса и логнормальности закона распределения колебаний цен. Закон логнормальности достаточно хорошо работает на денежных рынках, и основной проблемой является проблема выбора длины оценочного ряда, от которой существенным образом зависят результаты. В практической деятельности трейдеры ориентируются на то, в каком состоянии рынок находится в последнее время, и на ожиданиях рынка. При попытке применения аналогичного подхода к оценке опционов на погодно-климатические условия возникают три проблемы:

— модельное значение климатического индекса зависит от модели, т. е. фактически оно не определено достоверно, и ориентировка на долгосрочные прогнозы погоды также не состоятельна в силу их низкой оправдываемости;

— происходящие климатические изменения свидетельствуют о том, что процесс потерял стационарность и используемая в формулах величина σ сомнительна;

— проблема логнормальности, которая состоит в том, что климатические колебания отвечают, вообще говоря, не тем же законам, что колебания денежного рынка, хотя надо отметить, что зачастую соответствие имеется.

Однако полномасштабный анализ подобных закономерностей — проблема финансовых аналитиков, в отличие от построения моделей климата, относящихся к компетенции климатологов. Собственно обозначенные в этом пункте проблемы по сути являются проблемами адаптации срочного рынка к происходящим климатическим изменениям.

В заключение хотелось бы отметить, что рассмотренные в настоящей работе вопросы представляют особую важность для государственных органов, поскольку они теснейшим образом связаны с вопросами обеспечения продовольственной безопасности и стабильного функционирования компаний топливно-энергетического комплекса, т. е. тех отраслей экономики, от которых самым непосредственным образом зависит жизнедеятельность граждан России. Развитие «климатической» составляющей страхового сектора экономики необходимо также для снижения нагрузки на бюджет в случае возникновения целого ряда погодных явлений, в качестве наглядного примера которых может быть приведена аномальная жара, приводящая к лесным и торфяным пожарам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дорнбуш Р., Фишер С.* (1997). Макроэкономика. — М.: ИНФРА-М.
Коммерсант online от 18.02.2011. <http://www.kommersant.ru/>
- Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (2010). — М.: Росгидромет.
- AGROASEMEX (Programa de Atenciyn a Contingencias Climatolygicas) <http://www.agroasemex.gob.mx/>
- IPCC Third Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/index.htm>
- Lazo J. K., Lawson M., Larsen P. H., Waldman D. M.* (2011). U.S. economic sensitivity to weather variability // Bull. Amer. Met. Soc. V. 92, is. 6. P. 709—720.
<http://www.mercer.com/home>

УДК 620.9

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
(на примере Дальневосточного региона России)**

Н. В. Кобышева¹, Н. А. Кобышев²

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

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: sun@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 13.02.2012
Поступила после доработки 6.03.2012

1. Введение

Катастрофические события, произошедшие в 2011 г. в Японии, показали необходимость корректировки энергетической политики не только в Японии, но и в ближайших к ней регионах России, таких как Дальний Восток, который также можно считать входящим в зону риска. Это обстоятельство заставляет обратить повышенное внимание на обеспечение безопасности этого региона, что накладывает некоторые ограничения на строительство новых АЭС, ТЭС и крупных ГЭС. Безопасность можно обеспечить переходом на возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Цель настоящей работы заключается в разработке методики оптимизации выбора ВИЭ и ее реализации на территории Дальнего Востока.

Стратегия развития энергетики до 2020 г. и ее уточнения до 2030 г. придали новый импульс использованию альтернативных источников энергии. Этому способствовал прогресс в области энергетических технологий, позволяющий практически исключить энергетическую нестабильность и тем самым ответить на быстрый рост спроса на тепловую и электрическую энергию. Кроме того, по оценкам экспертов, через несколько лет общая генерирующая

мощность традиционной энергетики в России уже не сможет покрывать растущее потребление энергии (Христенко, 2006).

Развитие возобновляемой энергетики определяет климатическая составляющая, так как источником таких видов энергии служат климатические ресурсы, в частности ресурсы солнца, ветра, тепла Земли и т. п.

Ресурс (ресурсный потенциал) возобновляемого источника энергии — это объем энергии, заключенный или извлекаемый при определенных условиях из возобновляемого источника энергии в течение года.

При оценке эффективности ВИЭ рассчитываются следующие потенциалы (Ресурсы и эффективность..., 2002):

валовой (теоретический) потенциал — среднегодовой объем энергии, содержащийся в данном виде ВИЭ при полном ее превращении в полезную используемую энергию;

технический потенциал — часть валового потенциала, преобразование которого в полезно используемую энергию возможно при данном уровне развития технических средств при соблюдении требований по охране окружающей среды;

экономический потенциал — часть технического потенциала, преобразование которого в полезно используемую энергию экономически целесообразно при данном уровне цен на ископаемое топливо, тепловую и электрическую энергию, оборудование, материалы и транспортные услуги, оплату труда и др.

Валовой потенциал не позволяет количественно оценить целесообразность использования данного вида возобновляемой энергии. Он очень велик, и практически каждый из ВИЭ покрывает все потребности в энергии региона. Технический потенциал ближе к реальному, однако он также не может быть введен в экономический баланс. Оценка экономического баланса обычно затруднена и носит характер экспертной оценки. Тем не менее именно она представляет наибольший практический интерес и является наиболее объективной характеристикой.

По величине валового потенциала (особенно, ветровой и солнечной энергии) имеется обширная литература (Кобышева, 1983;

Борисенко, 2008; Стадник, 2008 и др.). Следует отметить отдельные работы по оценке технического потенциала солнечной энергии. Что касается экономического потенциала, то он климатологами не определялся.

В монографии *Климатические факторы возобновляемых источников энергии (2010)* предпринята попытка представить некоторую методику оценки экономического потенциала. Однако эта методика не доведена до стадии принятия с ее помощью решения по оптимизации применения ВИЭ.

Целесообразность и масштабы экономически оправданного применения ВИЭ всех видов должны определяться с учетом их конкурентоспособности в отношении традиционных энергоисточников. При этом определяющим экономическим фактором является себестоимость производимой тем или иным способом энергии, окупаемость и рентабельность энергоисточника, зависящие от капитальных и эксплуатационных затрат, стоимости топлива, КПД энергоисточника и числа часов его работы с номинальной мощностью, налоговой и кредитной политики и пр.

В настоящей работе методика оптимизации выбора ВИЭ доведена до конкретного использования на территории Дальнего Востока.

Генераторы солнечной энергии. Информационной базой для определения солнечного энергетического (гелиоэнергетического) потенциала являются климатические характеристики солнечного излучения, полученные по данным актинометрических измерений на государственной сети метеостанций. Климатические характеристики содержатся в электронном Научно-прикладном справочнике по климату России.

Технический и экономический потенциалы солнечной энергии определяются отдельно для производства тепла и электроэнергии, а также в виде суммы этих слагаемых. Наиболее освоенными в отечественной практике являются установки и системы солнечного горячего водоснабжения, являющиеся основой определения технического потенциала преобразования солнечной энергии в тепло. Необходимым параметром для определения технического по-

тенциала является площадь, на которой потенциально могли бы быть размещены солнечные установки. Обычно принимается, что суммарная площадь, занятая солнечными энергетическими установками, не превышает 1 % территории региона, а оптимальным соотношением площадей, занятых тепловыми и электрическими солнечными установками, является 4 : 1.

Технический потенциал субъекта РФ, таким образом, определяется умножением средней удельной теплопроизводительности установок солнечного горячего водоснабжения в данном регионе на площадь его территории и на коэффициент 0,008. Полученные значения технического потенциала пересчитываются в тонны условного топлива (т.у.т.) с учетом КПД замещаемого топливного устройства, значение которого обычно принимается равным 0,7 (Климатические факторы..., 2010).

В качестве средства производства электроэнергии за счет солнечной радиации рассматриваются фотоэлектрические установки (ФЭУ). Рабочая площадь солнечных ФЭУ принимается равной 0,1 % площади территории каждого субъекта РФ.

Также рассчитываются отдельно экономические потенциалы. Для их определения обычно используют различные упрощенные подходы. Для каждого субъекта РФ определяется число пользователей энергетическими установками и соответственно общая площадь солнечных коллекторов (СК) из расчета 1 м² СК на одного человека. Экономический потенциал (т.у.т./год) рассчитывается умножением общей потребной площади солнечных коллекторов на их годовую удельную тепловую выработку с учетом КПД СК. Экономический потенциал для производства электроэнергии установлен для каждого субъекта РФ как 0,05 % значений годового потребления электроэнергии в каждом из субъектов РФ (по данным Росстата за 2005 г.).

Генераторы ветровой энергии. Валовой потенциал региона является средним многолетним значением энергии ветровых потоков на территории региона. Для его определения регион представляется совокупностью зон с площадью каждой S_i , в которой

средняя годовая мощность ветровой энергии J_i определяется по данным наблюдений за ветром. В каждой зоне валовой потенциал (кВ · ч) оценивается по формуле

$$W_{val}^i = J_i T S_i, \quad (1.1)$$

где $T = 8760$ ч. Удельная мощность J_i пропорциональна кубу скорости ветра. Валовой потенциал региона определяется как сумма валовых потенциалов составляющих его зон.

Технический потенциал региона в соответствии с работой Климатические факторы... (2010) определяется как суммарное среднее многолетнее значение энергии ветра (кВ · ч), которая может быть получена в регионе при современном уровне развития технологий и техники при соблюдении экологических норм. Технический потенциал зависит от площади региона (считается, что ветроэнергетические установки (ВЭУ) могут занимать от 20 до 30 % всей площади региона), среднегодовой удельной мощности ветра в зонах, составляющих регион, а также средней энергетической эффективности ВЭУ (доли энергии ветра, превращаемой ВЭУ в полезную работу).

Экономический ветроэнергетический потенциал (ВЭУ) — возможная среднегодовая выработка энергии всех ВЭУ в регионе, строительство и использование которых экономически целесообразно при существующем уровне стоимости их производства или приобретения, доставки, строительно-монтажных работ и эксплуатации, а также стоимости доставки выработанной ими энергии потребителю и обеспечения соответствующих экологических требований. На основании мирового опыта и российской специфики экономический потенциал каждого региона обычно принимается равным 0,5 % величины технического ветропотенциала.

Гидроэнергетические генераторы. Технический потенциал малых рек изучался в семи административных округах. При этом учитывались количественные характеристики субъектов РФ в составе федеральных округов с соответствующими площадями их территорий. Установить экономический гидроэнергетический

потенциал всех малых рек России весьма затруднительно из-за отсутствия технико-экономических показателей природных и строительно-хозяйственных условий сооружения малых ГЭС.

Гидрогеотермальные генераторы. Оценка гидрогеотермальных ресурсов состоит в определении возможной производительности водозаборного сооружения. Ресурсы термальных вод определяются по месторождениям или эксплуатационным участкам. На месторождениях и в регионах оценка выполняется по результатам специальных разведочных работ или по данным эксплуатации действующих водозаборных сооружений. Региональные оценки осуществляют в пределах отдельных гидрогеологических структур по основным перспективным водоносным горизонтам, определяющих в комплексе размеры ресурсов и теплоэнергетический потенциал термальных вод, а также геолого-экономические показатели их промышленного освоения.

В данной работе остальные виды ВИЭ не рассматриваются в связи с тем, что они неконкурентоспособны по сравнению с перечисленными выше.

2. Географическое распределение экономических потенциалов энергоресурсов на Дальнем Востоке

Территория Дальнего Востока является весьма перспективной для перевода на энергообеспечение за счет ВИЭ, которое обеспечит энергетическую независимость и безопасность региона.

По результатам работы Безруких и др. (2007), использовавших данные о потенциальных ресурсах, полученные в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (Кобышева, 1983; Борисенко, 2008; Стадник, 2008 и др.), авторами настоящей работы построены карты экономического потенциала различных видов энергии для данного региона.

Дальневосточный федеральный округ является единственным регионом России, в котором возможно использование геотермальной энергии. Однако использовать ее можно не на всей тер-

ритории Дальнего Востока, а лишь в отдельных районах Чукотки, Камчатки и Курильских островов.

Регион также обладает большими запасами солнечной, ветровой и гидроэнергии. На рис. 2.1—2.3 представлено распределение экономических потенциалов этих трех видов энергии. Поскольку солнечная энергия используется не только для выработки электричества, но и для отопления, ее потенциал традиционно измеряется в тоннах условного топлива (т.у.т.).

Различные географические районы России характеризуются разными видами электроснабжения. В наиболее технически развитых районах используется централизованное энергоснабжение, в то время как в малонаселенных и технически неразвитых районах централизованное энергоснабжение заменено автономным. При этом в ряде районов используется смешанное энергоснабжение.

На территории Дальнего Востока имеют место все эти три вида энергоснабжения: в южной части (Приморский и Хабаровский край) развито централизованное энергоснабжение, в центральной части (Магаданская область) — смешанное энергоснабжение, а на Камчатке и Курильских островах — автономное.

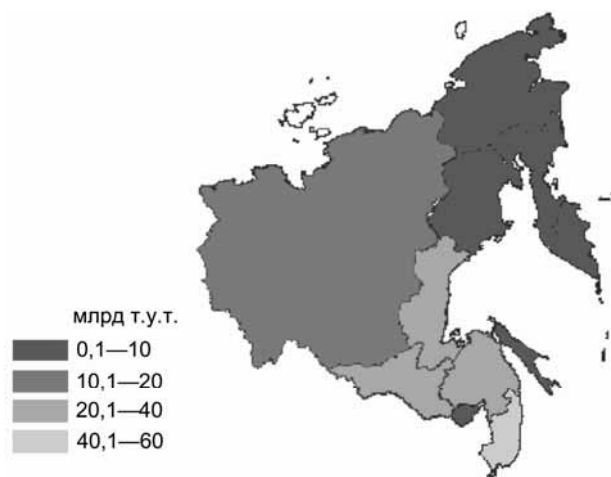


Рис. 2.1. Распределение экономического потенциала солнечной энергии (млрд т.у.т.).

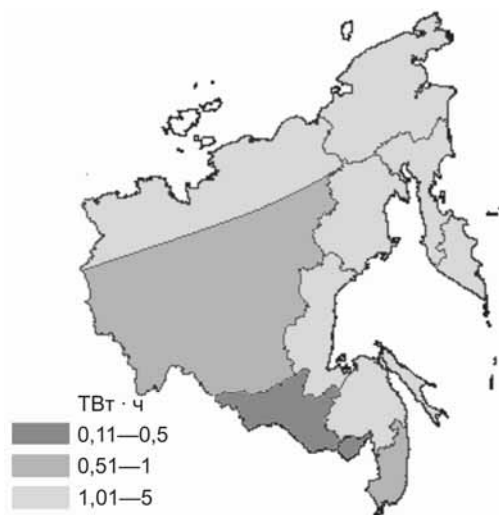


Рис. 2.2. Распределение экономического потенциала ветровой энергии (ТВт · ч).

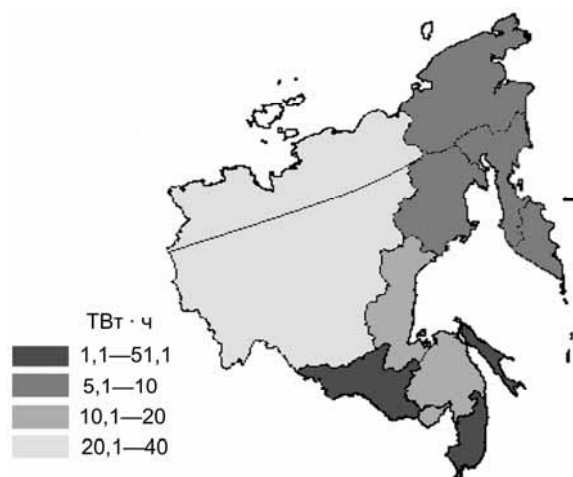


Рис. 2.3. Распределение экономического потенциала гидроэнергии (ТВт · ч).

Из представленных на рисунках карт следует, что наибольшие возможности для развития всех видов ВИЭ наблюдаются в южной части Дальнего Востока. В центральной части малоэффективно развитие геотермальной и гелиоэнергетики. Наконец, в северной части возможным видом ВИЭ можно считать геотермальные источники.

3. Методы оценки эффективности инвестиций в возобновляемую энергетику

Существует несколько способов обоснования эффективности инвестирования. Наиболее часто в зарубежной практике используются следующие методы (Климатические факторы..., 2010).

Оценка срока окупаемости (возврата) инвестиций. Оценка срока окупаемости (Pay-Back Period, PB) используется для вычисления периода времени, необходимого для того, чтобы доходы, генерируемые инвестициями, покрыли затраты на проект. При расчете данной характеристики не учитывается временная ценность денег. Этот показатель определяют последовательным расчетом чистого дохода (Present Value, PV) для каждого периода проекта. Точка, в которой PV принимает положительное значение, является точкой окупаемости. При выборе из нескольких инвестиционных проектов выбирается тот, срок окупаемости которого меньше.

Метод чистой существующей стоимости. Оценка чистой приведенной стоимости (Net Present Value, NPV) — это сумма дисконтированных значений потока платежей, приведенных к ценности денег на момент расчета. Показатель NPV характеризует величину денежных средств, которые инвестор ожидает получить от проекта после того, как денежные притоки окупят его первоначальные инвестиционные затраты и периодические денежные оттоки, связанные с осуществлением проекта. Таким образом, значение NPV может быть интерпретировано как общая прибыль инвестора. Расчет NPV производится по следующей формуле:

$$\text{NPV} = \sum_{t=0}^N \frac{\text{CF}_t}{(1+i)^t} = -\text{IC} + \sum_{t=1}^N \frac{\text{CF}_t}{(1+i)^t}, \quad (3.1)$$

где i — ставка дисконтирования, CF_t — поток платежей (Cash Flow) в период t , N — число периодов, IC — величина инвестированного капитала.

Метод внутренней нормы доходности. Значение внутренней нормы доходности (Internal Rate of Return, IRR) характеризует процентную ставку, при которой чистый дисконтированный доход NPV равен нулю. Значение IRR определяется по следующей формуле:

$$\text{NPV} = -\text{IC} + \sum_{t=1}^N \frac{\text{CF}_t}{(1 + \text{IRR})^t} = 0, \quad (3.2)$$

или

$$\text{IC} = \sum_{t=1}^N \frac{\text{CF}_t}{(1 + \text{IRR})^t}. \quad (3.3)$$

4. Использование теории принятия решений для анализа инвестиционных проектов

Поскольку выбор наилучшего инвестиционного проекта является задачей выбора вариантов из заданного множества альтернатив при условии определенности, для ее решения целесообразно воспользоваться методами теории принятия решений.

В рамках принятия решения в условиях определенности справедлива следующая модель задачи принятия решений:

X — множество альтернатив (инвестиционных проектов);

Y — множество исходов;

$f_i: Y \rightarrow R, i = 1, \dots, m$ — множество критериев (показателей качества), где R — множество вещественных чисел;

$\phi: X \rightarrow Y$ — детерминистская функция, отображающая множество альтернатив во множество исходов.

Таким образом, предполагается, что каждому решению $x \in X$ соответствует единственный элемент $y \in Y$, где $y = \phi(x)$. Исходы y оцениваются m числами в соответствии с зависимостью f_i . Предполагается, что каждую из функций f_i необходимо максимизировать (в противном случае выполняется замена $f_i^* < -f_i$). С помощью суперпозиции

$$J_i(x) = f_i(\phi(x)), \quad i = 1, \dots, m, \quad (4.1)$$

можно непосредственно оценивать качество решения x . Кроме того, можно работать с векторным отображением

$$J : x \rightarrow R^M, \quad J = (J_1, \dots, J_m), \quad J(X) = F \subset R^m. \quad (4.2)$$

Задание бинарного отношения R на множестве исходов Y индуцирует соответствующее бинарное отношение R'' на множестве X :

$$(x_1, x_2) \in R'' \Leftrightarrow (\phi(x_1), \phi(x_2)) \in R'. \quad (4.3)$$

Соответственно возникает бинарное отношение R''' на множестве оценок $F \subset R^m$:

$$\forall z_1, z_2 \in F : (z_1, z_2) \in R''' \Leftrightarrow (y_1, y_2) \in R', \quad (4.4)$$

где $z_1 = f(y_1)$, $z_2 = f(y_2)$.

Из приведенных выражений следует, что в условиях определенности (данное условие выполняется в случае выбора инвестиционного проекта) отношения предпочтения могут задаваться в любом из множеств X , Y , F . Обычно в качестве основного рассматривается отображение

$$J : X \rightarrow F \subset R^m, \quad (4.5)$$

т. е. системы предпочтений задаются во множествах X и F .

В задаче выбора инвестиционного проекта рассматривается многокритериальная оптимизация вида

$$f_i(x) \rightarrow \max_{x \in D} f_i : D \rightarrow R, \quad i = 1, \dots, m; \quad D \subseteq R^n. \quad (4.6)$$

Выражение (4.6) подразумевает, что задано m функций f_i , отображающих множество D n -мерных векторов $x = (x_1, \dots, x_n)$ во множество вещественных чисел R . Предполагается, что выбор оптимальных значений x производится не во всем n -мерном пространстве R^n , а в некотором его подмножестве D . Существует ряд методов решения задачи (4.6), основные из которых приведены ниже.

Метод главного критерия. В методе главного критерия в качестве целевой функции выбирается один из функционалов f_i (обычно функционалы индексируют таким образом, чтобы им оказался f_1), который наиболее полно отражает цель принятия решения. Остальные требования к результату, описываемые функционалами f_2, \dots, f_m , учитываются с помощью введения дополнительных ограничений. Таким образом, задача (4.6) сводится к следующей:

$$f_1(x) \rightarrow \max_{x \in D} D' \subseteq D \subseteq R^n, \\ D' = \{x \in D / f_i(x) \geq t_i, i = 2, \dots, m\}. \quad (4.7)$$

Метод главного критерия может быть расширен на случай допустимости принятия более одного решения. Это расширение может быть полезно, когда значения $f_i(x)$, $x \neq x^*$ (x^* удовлетворяет нижеследующему условию (4.8)) близки к значению $f_i(x^*)$. В этом случае критерий можно переписать в виде

$$\left\{ f_1(x^*) \rightarrow \max_{x \in D} D', x : |x - x^*| < \varepsilon |x^*| \right\}, \quad D' \subseteq D \subseteq R^n, \\ D' = \{x \in D / f_i(x) \geq t_i, i = 2, \dots, m\}. \quad (4.8)$$

Значение ε ($0 < \varepsilon < 1$) определяет степень близости допустимых альтернатив. Назначение главного критерия и допустимых огра-

ничений на остальные частные критерии — задача лица, принимающего решение. Очевидно, что этот шаг оказывает решающее влияние на результат выбора окончательного решения.

Необходимо отметить, что, несмотря на то что задача (4.8) не эквивалентна задаче (4.6), ее решения достаточно для обоснованного принятия решений.

Метод линейной свертки. Данный метод заключается в скаляризации задачи (4.6), позволяющей заменить векторный критерий оптимальности на скалярный $J : D \rightarrow R$. Он основан на линейном объединении функционалов f_1, \dots, f_m :

$$J(x) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x) \rightarrow \max_{x \in D}, \quad a_i > 0, \quad \sum_{i=1}^m a_i = 1. \quad (4.9)$$

Весовые коэффициенты a_i характеризуют значимость отдельных критериев для задачи оптимизации. Чем больше значение, устанавливаемое для коэффициента a_i , тем больший вклад вносит критерий f_i в сумму (4.9). Значения весовых коэффициентов устанавливаются методом экспертных оценок; как и в случае метода главного критерия, их выбор обычно является определяющим для результата работы метода.

Метод максиминной свертки. Метод максиминной свертки применяется в форме

$$J(x) = \min_i f_i(x) \rightarrow \max_{x \in D}. \quad (4.10)$$

В отличие от метода линейной свертки здесь на целевой функционал $J(x)$ оказывает влияние только тот критерий оптимальности, которому в данной точке x соответствует наименьшее значение соответствующей функции $f_i(x)$. Данное свойство имеет некоторое преимущество перед формулой (4.9): если в ней возможны высокие значения функционала J за счет высоких значений некоторых f_i , то в формуле (4.10) значение функциона-

ла J обеспечивается минимальным значением f_i . Таким образом, производится расчет по самому плохому значению критерия для каждого варианта.

Возможна также взвешенная форма максиминного критерия, описываемая формулой

$$J(x) = \min_i a_i f_i(x) \rightarrow \max_{x \in D}, \quad (4.11)$$

где коэффициенты a_i удовлетворяют требованиям выражения (4.9).

При принятии решения обычно применяются все указанные критерии, а затем на основании экспертных оценок или методом усреднения принимается окончательное решение.

5. Оценка возможности использования ВИЭ на Дальнем Востоке

5.1. Расчет инвестиционных характеристик ВИЭ

Для вычисления инвестиционных характеристик ВИЭ были использованы данные, приведенные в табл. 5.1 (Николаев, 2010). Цена 1 кВт электроэнергии принята равной 3,4 руб.

Таблица 5.1

Экономические характеристики ВИЭ

Вид ВИЭ	Капзатраты на строительство ЭС, тыс. руб. на 1 кВт номинальной мощности	Годовая выработка, кВт · ч на 1 кВт номинальной мощности ЭС	Затраты на эксплуатацию, тыс. руб. на 1 кВт номинальной мощности за ресурс	Себестоимость электроэнергии ЭС, руб./ (кВт · ч)
Ветровые ЭС	50	3000	25	1,24
Гидро-ЭС	30	3000	24	1,04
Геотермальные ЭС	67	4500	83,8	1,34
Гелио-ЭС	34	4700	16	1,1

Для заданных экономических характеристик ВИЭ были рассчитаны показатели инвестиционной эффективности. Срок окупаемости (РВ) представлен в табл. 5.2. Значения чистой существующей стоимости для различных видов ВИЭ представлены в табл. 5.3. Жирным шрифтом выделены значения, соответствующие годам, начиная с которых ВИЭ начинает приносить доход (с учетом инфляции за год 12 %).

Таблица 5.2

Срок окупаемости (РВ) для различных видов ВИЭ

Вид ВИЭ	Срок окупаемости, число лет
Ветровые ЭС	8
Гидро-ЭС	5
Геотермальные ЭС	8
Гелио-ЭС	4

Таблица 5.3

Значения чистой существующей стоимости (NPV) для различных видов ВИЭ при инфляции за год 12 %

Вид ВИЭ	Срок окупаемости, число лет					
	2	3	4	5	13	15
Ветровые ЭС	-32568,4	-27956,1	-23837,9	-20161,0	-1895,4	614,4
Гидро-ЭС	-10954,4	-5915,0	-1415,5	2601,8	22558,7	25300,9
Геотермальные ЭС	-42063,2	-35465,0	-29573,7	-24313,7	1816,2	5406,7
Гелио-ЭС	-4920,5	2773,7	9643,7	15777,6	46248,5	50435,4

График изменения NPV приведен на рис. 5.1. Значения IRR были вычислены в предположении, что срок окупаемости проекта соответствует значениям, определенным при расчете NPV в табл. 5.3. Результаты расчета IRR сведены в табл. 5.4. Кроме указанных

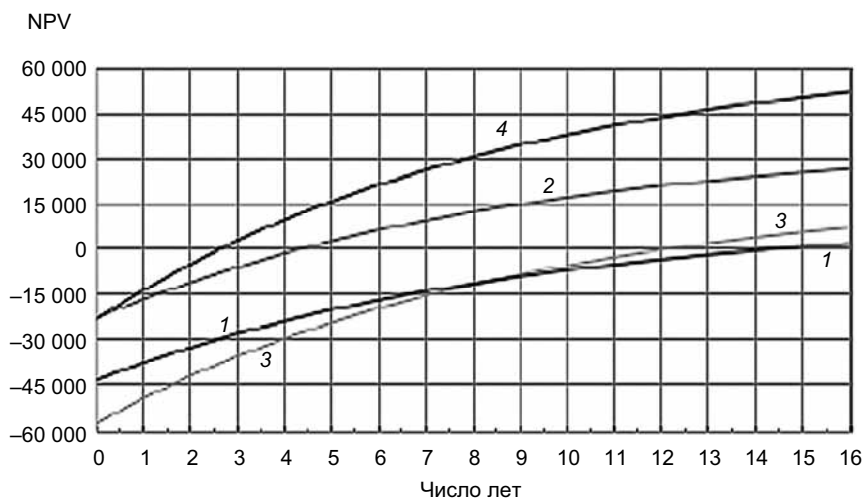


Рис. 5.1. Зависимость NPV от времени для различных ВИЭ.
 1 — ветровые ЭС, 2 — гидро-ЭС, 3 — геотермальные ЭС, 4 — гелио-ЭС.

показателей, рассчитана ежегодная прибыль, получаемая при использовании различных видов ВИЭ, на 1 кВт номинальной мощности. Рассчитанные показатели представлены в табл. 5.5.

По данным об экономических потенциалах субъектов региона и табл. 5.5 были рассчитаны значения потенциальной прибыли, получаемой при использовании различных видов ВИЭ (табл. 5.6).

Таблица 5.4

**Значения внутренней нормы доходности (IRR)
 для различных видов ВИЭ**

Вид ВИЭ	IRR
Ветровые ЭС	0,123
Гидро-ЭС	0,165
Геотермальные ЭС	0,126
Гелио-ЭС	0,188

Таблица 5.5

**Ежегодная прибыль при использовании
различных видов ВИЭ на 1 кВт
номинальной мощности**

Вид ВИЭ	Прибыль на 1 кВт номинальной мощности, руб.
Ветровые ЭС	10 200
Гидро-ЭС	10 200
Геотермальные ЭС	15 300
Гелио-ЭС	15 980

Таблица 5.6

**Потенциальная годовая прибыль от ВИЭ (млн руб.) для различных
субъектов Дальнего Востока**

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область	648	33 276	2384,9
Еврейская АО	259,2	3540	466,4
Камчатский край	9136,8	43 188	26,4
Магаданская область	11 599,2	41 772	35,2
Приморский край	5637,6	85 668	4699,4
Сахалинская область	907,2	7788	35,2
Хабаровский край	11 469,6	72 216	2692,9
Чукотский АО	16 200	67 260	8,8
Якутия	22 615,2	283 200	1267,2

В табл. 5.6 не приведена информация о геотермальных ВИЭ, так как их использование возможно лишь в Камчатском крае и на Курильских островах.

В результате проведенных расчетов получена информация, на базе которой можно сделать вывод об инвестиционной привлека-

тельности различных ВИЭ для субъектов Дальнего Востока. Ниже будет приведена комплексная оценка полученных факторов.

5.2. Принятие решений о выборе ВИЭ для различных субъектов

Для применения методов теории принятия решений, описанных в п. 2, рассчитанные выше показатели сведены в таблицы принятия решений. В качестве примера приведена таблица для Амурской области (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Значения функционалов для принятия решений для Амурской области

Вид источника	Функционал			
	f_1	f_2	f_3	f_4
Ветровые ЭС	6,48E+8	-8	-15	0,123
Гидро-ЭС	3,3276E+10	-5	-5	0,165
Геотермальные ЭС	—	-8	-13	0,126
Гелио-ЭС	2,38491E+9	-4	-3	0,188

В данной таблице в качестве функционалов f_i , $i = 1, \dots, 4$, приняты следующие величины:

f_1 — годовая прибыль (руб.),

f_2 — простой срок окупаемости,

f_3 — срок окупаемости с учетом инфляции,

f_4 — значение IRR.

Значения функционалов f_2 и f_3 взяты с измененным знаком для того, чтобы к ним могли быть применены методы принятия решений.

Ниже рассмотрены результаты примененных методов принятия решений.

Метод главного критерия. Как было отмечено в п. 2, ключевым принципом метода является выбор главного критерия, по которому осуществляется оптимизация. В настоящей работе в качестве такого критерия была рассмотрена величина годовой прибыли ВИЭ. Ограничений на другие критерии не устанавливалось.

Результаты применения метода главного критерия приведены в табл. 5.8. Из таблицы видно, что применение простого метода главного критерия к задаче выбора ВИЭ привело к следующему результату: для всех областей предпочтительнее всего развитие гидроэнергетики. Это объясняется не столько высокими годовыми прибылями данного вида ВИЭ, сколько большим экономическим потенциалом региона для развития гидроэнергетики.

Кроме простого метода главного критерия была применена его модификация на случай принятия более одного варианта решения (значение ε принималось равным 0,9). Результаты ее применения сведены в табл. 5.9.

Из таблиц видно, что, согласно методу главного критерия, гидроэлектростанции являются приоритетным выбором в большинстве регионов, однако ветровые и гелиоэлектростанции также могут использоваться в большинстве регионов.

Таблица 5.8

Результаты применения простого метода главного критерия

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область		+	
Еврейская АО		+	
Камчатский край		+	
Магаданская область		+	
Приморский край		+	
Сахалинская область		+	
Хабаровский край		+	

Таблица 5.9

Результаты применения модификации простого метода главного критерия для возможности принятия нескольких вариантов решения

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область		++	+
Еврейская АО	+	++	+
Камчатский край	+	++	
Магаданская область	++	++	
Приморский край	+	++	+
Сахалинская область	+	++	
Хабаровский край	++	++	+
Чукотский АО	++	++	
Якутия	+	++	

Примечание. ++ проект является оптимальным или очень близок к оптимальному; + проект не является оптимальным, но сравнительно близок к нему.

Метод линейной свертки. Для использования метода линейной свертки значения функционалов f_1, \dots, f_4 необходимо привести к единой системе величин измерения. В качестве такой системы используется градация по значениям функционалов по 10-балльной шкале.

Для функционалов f_2, f_3, f_4 перевод в новую систему осуществлялся по формуле

$$v_i = \left[\frac{f_i(x) - \min_x f_i(x)}{\max_x f_i(x) - \min_x f_i(x)} \cdot 10 \right], \quad i = 2, \dots, 4. \quad (5.1)$$

В то же время, значения функционала f_1 имеют разный порядок (например, см. табл. 5.7). Для него целесообразно использовать логарифмическую формулу перехода:

$$v_1 = \left[\frac{\lg f_1(x) - \lg \min_x f_1(x)}{\lg \max_x f_1(x) - \lg \min_x f_1(x)} \cdot 10 \right]. \quad (5.2)$$

Все показатели были приведены к новой системе. Пример для функционала f_1 представлен в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область	5	8	6
Еврейская АО	4	6	4
Камчатский край	7	8	1
Магаданская область	8	8	2
Приморский край	7	10	6
Сахалинская область	5	7	2
Хабаровский край	8	9	6
Чукотский АО	8	9	1

Для применения метода взяты значения весовых коэффициентов $\alpha_1, \dots, \alpha_4$, приведенные в табл. 5.11.

Таблица 5.11

Значения весовых коэффициентов α_i

α_1	α_2	α_3	α_4
0,4	0,1	0,3	0,2

Рассчитанное значение максимизируемой функции $\sum_{i=1}^4 \alpha_i f_i(x)$ приведено в табл. 5.12. Из таблицы можно сделать вывод об оптимальности использования различных видов ВИЭ при применении рекомендаций, полученных методом линейной свертки. Аналогично случаю метода главного критерия можно рассмат-

ривать не только варианты, соответствующие максимальному значению критерия, но и варианты, функционал которых достаточно близок к максимальному. Результаты анализа вариантов принятия решения по методу линейной свертки приведены в табл. 5.13.

Таблица 5.12

Значение функции $\sum_{i=1}^4 a_i f_i(x)$

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область	2,6	6,1	8,4
Еврейская АО	2,2	5,3	7,6
Камчатский край	3,4	6,1	6,4
Магаданская область	3,8	6,1	6,8
Приморский край	3,4	6,9	8,4
Сахалинская область	2,6	5,7	6,8
Хабаровский край	3,8	6,5	8,4
Чукотский АО	3,8	6,5	6,4

Таблица 5.13

Оценка выбора ВИЭ по методу линейной свертки

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область			++
Еврейская АО			++
Камчатский край		+	++
Магаданская область		+	++
Приморский край			++
Сахалинская область			++
Хабаровский край			++
Чукотский АО		++	+

Примечание. ++ выбор является оптимальным; + выбор не является оптимальным, но значение его функционала отличается от максимального менее чем на единицу.

Метод минимаксной свертки. Как было показано в п. 2, данный метод ориентирован на максимизацию минимального значения $a_i f_i(x)$, $i = 1, \dots, 4$.

Таким образом, он ориентирован на увеличение наилучшего параметра варианта выбора.

Результаты оценки $\min a_i f_i(x)$ приведены в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Значения функции $\min a_i f_i(x)$ для метода минимаксной свертки с учетом весовых коэффициентов a_i

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область	0,1	0,6	1
Еврейская АО	0,1	0,6	1
Камчатский край	0,1	0,6	0,4
Магаданская область	0,1	0,6	0,8
Приморский край	0,1	0,6	1
Сахалинская область	0,1	0,6	0,8
Хабаровский край	0,1	0,6	1
Чукотский АО	0,1	0,6	0,4
Якутия	0,1	0,6	1

Результаты выбора ВИЭ по методу минимаксной свертки приведены в табл. 5.15.

В основном значение оценки $\min_i a_i f_i(x)$ определяется значением простого периода окупаемости (РВ). Это связано с тем, что значение соответствующего весового коэффициента $a_2 = 0,1$ выбрано сравнительно низким. Такой выбор обусловлен малой информативностью значения функционала f_2 . Значение простого периода окупаемости проекта не может иметь решающего значения, так как он не учитывает показатель инфляции. Согласно данному методу, наибольший приоритет практически во всех ре-

Таблица 5.15

Приоритеты использования различных ВИЭ (по методу минимаксной свертки) с учетом весовых коэффициентов a_i

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область			+
Еврейская АО			+
Камчатский край		+	
Магаданская область			+
Приморский край			+
Сахалинская область			+
Хабаровский край			+

гионах получили гелиостанции. Это связано со сравнительно коротким сроком простой окупаемости у данного типа станций.

Применение простого метода минимаксной свертки, не учитывающего весовых коэффициентов (формула (4.10)), может быть более рационально в случае наличия коэффициента a_i , обладающего сравнительно низким значением. Результаты применения данного метода указаны в табл. 5.16.

Видно, что для данного метода распределение наилучших ВИЭ получилось более разбросанным (см. табл. 5.17). Стоит, однако, отметить, что ветровые ЭС не были признаны лучшим решением по данному методу ни в одном субъекте, что вызвано их большим сроком окупаемости.

Окончательный выбор предпочтительных возобновляемых источников энергии на территории Дальнего Востока РФ можно сделать, руководствуясь данными табл. 5.9, 5.13, 5.15, 5.17.

При принятии окончательного решения наибольшее внимание уделялось результатам метода главного критерия и линейной свертки, так как они за счет дифференциации функционалов были ориентированы на экономический потенциал субъектов.

Таблица 5.16

**Значения функции $\min a_i f_i(x)$ для метода минимаксной свертки
без учета весовых коэффициентов a_i**

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область	1	3	6
Еврейская АО	1	3	4
Камчатский край	1	3	1
Магаданская область	1	3	2
Приморский край	1	3	6
Сахалинская область	1	3	2
Хабаровский край	1	3	6

Таблица 5.17

**Приоритеты использования различных ВИЭ (по методу минимаксной
свертки) без учета весовых коэффициентов a_i**

Регион	Вид ВИЭ		
	Ветровые ЭС	Гидро-ЭС	Гелио-ЭС
Амурская область			+
Еврейская АО			+
Камчатский край		+	
Магаданская область		+	
Приморский край			+
Сахалинская область		+	
Хабаровский край			+

6. Выбор проектов ВИЭ для различных субъектов

При анализе представленных в п. 5 таблиц был сделан следующий вывод: все три вида энергетики (ветровую, гидро- и гелиоэнергетику) можно развивать на территории Еврейской АО, Приморского и Хабаровского краев. На территории Чукотки, Магаданской и Сахалинской областей, а также Камчатского края

малоэффективно развитие солнечной энергетики (ввиду низкого потенциала территории в отношении данного вида энергетики). На территории Якутии целесообразно развивать в основном гидроэнергетику (вполне приемлемая для всего региона ветроэнергетика не может эффективно развиваться из-за полугодичного антициклона), а в Амурской области решающую роль должны играть ветро- и гелиоустановки.

На рис. 6.1 представлена результирующая карта ВИЭ, рекомендуемых для различных районов Дальнего Востока. Из анализа карты следует, что на юге Дальнего Востока можно эффективно развивать солнечную энергетику, а на северных и прибрежных территориях — ветроэнергетику. Практически на всей площади Дальнего Востока имеется обоснованная возможность развития гидроэнергетики.



Рис. 6.1. Рекомендуемые ВИЭ для различных районов Дальнего Востока.

1 — все виды; 2 — все виды, кроме солнечной энергии; 3 — все виды, кроме гидроэнергии; 4 — гидроэнергетика.

Ввиду отсутствия данных оказалось невозможным применение теории принятия решений для определения возможности использования геотермальной энергетики на всей территории региона. Однако известно, что большой потенциал северных регионов для развития данного вида энергетики рассматривается как весьма перспективный.

Методика объективного выбора оптимальных ВИЭ и ее реализации представлены в настоящей работе впервые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безруких П. П., Дектярев В. В., Елистратов В. В. и др. (2007). Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территории). — М.: Энергия. 272 с.

Борисенко М. М., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л. (2008). Оценка ветроэнергетических ресурсов на территории России // Труды ГГО. Вып. 557. С. 53—66.

Климатические факторы возобновляемых источников энергии (2010) / Под ред. В. В. Елистратова, Н. В. Кобышевой, Г. И. Сидоренко. — СПб: Наука. 235 с.

Кобышева Н. В., Чмутова З. Е., Степанская Г. А. (1983). Оценка потенциальных ветроэнергетических ресурсов на территории СССР // Труды ГГО. Вып. 475. С. 7—12.

Николаев В. Г., Ганага С. В., Кудряшов Ю. И. и др. (2009). Перспективы развития возобновляемых источников энергии в России. — М.: Атмограф. 455 с.

Основные положения энергетической стратегии России на период до 2020 г. (2001). — М., Министерство энергетики РФ. 120 с.

Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России (2002) / Под ред П. П. Безруких и др. — СПб: Наука. 305 с.

Стадник В. В., Шанина И. Н. (2008). Оценка гелиоэнергетических ресурсов Российской Федерации // Метеоспектр. № 2. С.128—133.

Христенко В. Электроэнергетика потеряла пять процентов ВВП (2006) // Академия энергетики. № 4. С. 3—15.

УДК 551.510.42

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ВОЗДУХА АТМОСФЕРНЫМИ АЭРОЗОЛЯМИ
ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

*Е. Л. Генихович¹, И. Г. Грачева¹, В. А. Ионин², Р. И. Оникул¹,
Д. Ю. Румянцев¹, Е. Н. Филатова¹, Е. А. Яковлева¹*

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: ego@main.mgo.rssi.ru

² Санкт-Петербургский институт «Атомэнергoproject»
191036 Санкт-Петербург, ул. 2-я Советская, 9/2а
E-mail: v_ionin@so2.spbaer.ru

1. Введение

Согласно существующим в настоящее время в физике, метеорологии и технических науках представлениям, под аэрозолем понимается дисперсная система, состоящая из мелких твердых или жидких частиц, взвешенных в газовой среде, обычно в воздухе. Таким образом, атмосферные аэрозоли — это аэродисперсные (коллоидные) системы, в которых во взвешенном состоянии могут находиться твердые частицы и/или капельки жидкости. Аэрозоли, дисперсная фаза которых состоит из капелек жидкости, называются туманами, а в случае твердой дисперсной фазы говорят о дымах или, для грубодисперсных аэрозолей, о пыли (см., например, работу Грина, Лейна (1972)). При этом, как отмечено в монографии Seinfeld, Pandis (2006), в метеорологии и физике атмосферы обычно при упоминании аэрозолей имеются в виду только твердые частицы.

Атмосферные аэрозоли играют важную роль в ряде атмосферных процессов, в том числе, например, ответственных за формирование облаков и осадков, климата Земли и др. Они также оказывают значительное негативное воздействие на здоровье людей и состояние окружающей среды (см., например, работу Wilson, Spengler (1996)). В технике негативное воздействие атмосферных

аэрозолей приходится учитывать при решении широкого круга научно-технических проблем, включая задачи вентиляции и воздухообмена, борьбу с коррозией, организацию производств особо чистых материалов и др.

Научные исследования в области математического и физического моделирования поведения аэрозолей в атмосфере и экспериментального исследования их свойств и закономерностей распространения имеют достаточно длительную историю. Среди фундаментальных публикаций в данной области можно упомянуть классические монографии Фукса (1961), Левича (1959), Юнге (1965), Селезневой (1966), Берлянда (1975), Кондратьева, Москаленко, Позднякова (1983), Ньистадта и ван Допа (1985), Мони́на и Яглома (1991), цитировавшийся выше курс Seinfeld, Pandis (2006), а также работы Мони́на (1962), Бютнер (1978), Петренчук (1979), Райста (1987), Ивлева и Довгалюк (1999), Алояна (2002) и др.

В упомянутой монографии Берлянда (1975) впервые в отечественной литературе была поставлена и решена задача разработки ориентированного на массовое практическое использование метода расчета распространения пыли, поступающей в атмосферу от промышленных источников. Первые результаты в этом направлении ранее уже были получены в ГГО Берляндом и Оникулом (1971). Важно отметить, что при этом было представлено численное решение задачи о диффузии полидисперсной примеси, в то время как в соответствующих зарубежных работах прикладного характера вплоть до настоящего времени в основном моделируется атмосферная диффузия только монодисперсной примеси. Последующее развитие используемый подход получил в публикациях Хуршудяна (2002) и Оникула, Яковлевой (2008).

На основе результатов, полученных специалистами ГГО, разработаны нормативно-методические документы, которые действуют вплоть до настоящего времени (см., например, работу Берлянда и др. (1987); далее на этот документ мы будем ссылаться как на ОНД-86) и обеспечивают возможность расчета загрязнения воздуха выбросами пыли от локальных источников промышленности, энергетики, транспорта, городского хозяйства и пр. Вместе с тем, к настоящему времени определился ряд практически важных задач, связанных с оценкой распространения аэрозолей в атмосфере,

для решения которых методы, положенные в основу расчетных формул, нуждаются в определенном обобщении. Так, при решении ряда прикладных проблем возникает необходимость в восстановлении вертикального распределения концентрации аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы по данным измерений на фиксированной высоте вблизи подстилающей поверхности. При этом предполагается, что искомое распределение является стационарным и однородным по горизонтали.

Вертикальная структура «ветропесчаного потока» рассмотрена в работах Семенова (1977), Бютнер (1978), Gillette et al. (1974), Каипова и др. (1985), а также в ряде других публикаций (см., в частности, статью Bowker et al. (2007), где приведена достаточно подробная библиография), в которых, в первую очередь, анализируются характеристики пыльных бурь. Однако физический механизм («сальтация»), определяющий вертикальное распределение аэрозолей при пыльных бурях, играет существенную роль только при очень высоких скоростях ветра, а при меньших скоростях следует пользоваться так называемым диффузионным приближением, в рамках которого это распределение определяется из решения уравнения атмосферной диффузии (см., например, работы Левича (1959), Бютнер (1978), Seinfeld, Pandis (2006)).

В предлагаемой работе рассматривается задача описания в диффузионном приближении вертикального распределения концентрации моно- и полидисперсных аэрозолей в термически стратифицированном горизонтально однородном приземном слое атмосферы.

Оценка выпадения атмосферных примесей на подстилающую поверхность также является важной составной частью работ по моделированию распространения примесей в атмосфере, которая, в частности, обеспечивает возможность корректного описания обусловленной загрязнением воздуха нагрузки на окружающую среду. При этом различают гравитационное выпадение (используется также термин «седиментация»), связанное с осаждением содержащихся в воздухе аэрозолей под действием силы тяжести, а также так называемые «влажное» и «сухое» осаждение, характеризующие соответственно эффекты вымывания примесей из

воздуха атмосферными осадками и эффекты удаления примесей из атмосферы в результате их непосредственного взаимодействия с подстилающей поверхностью. Следует подчеркнуть, что в настоящей работе задачи, возникающие при описании влажного осаждения, не рассматриваются.

Принципы моделирования гравитационного выпадения примесей в настоящее время можно считать устоявшимися (см., например, работы Берлянда (1975), Seinfeld, Pandis (2006), Алояна (2002)). В случае монодисперсных «тяжелых» примесей (аэрозоли, включая пыль), характеризующихся скоростью оседания («свободного падения») w_g , эффект гравитационного выпадения в уравнении атмосферной диффузии для концентрации примеси c описывается слагаемым $-w_g \frac{\partial c}{\partial z}$, где ось z направлена против на-

правления силы тяжести (в случае плоской горизонтальной подстилающей поверхности — по нормали к этой поверхности). При этом значение w_g определяется из условия равенства приложенных к падающей частице силы тяжести и силы сопротивления движению (т. е. «силы трения»).

Локальный поток примеси на подстилающую поверхность за счет седиментации определяется как произведение концентрации примеси вблизи рассматриваемой точки поверхности и скорости оседания. Значения концентрации и/или выпадения полидисперсной примеси определяются путем интегрирования концентраций (и соответственно выпадений) монодисперсной примеси по спектру, характеризующему распределение аэрозольных частиц по скорости оседания.

Сухое осаждение примесей на подстилающую поверхность описывается путем введения в граничное условие для потока примеси, используемое при решении уравнения атмосферной диффузии, дополнительного слагаемого, равного произведению концентрации c на так называемую скорость сухого осаждения v_d . Заметим, что указанное граничное условие, в принципе, может ставиться не на подстилающей поверхности, а на некотором уровне над поверхностью (см, например, работу Fenger, Hertel, Palmgren (1998)). Значения v_d

устанавливаются с учетом физико-химических свойств рассматриваемых примесей, особенностей подстилающей поверхности и покрывающей ее растительности и др.

Основной способ определения v_d основан на применении так называемой электрической аналогии, в которой активно используются понятия проводимости и сопротивления атмосферных слоев, в том числе слоя развитого турбулентного обмена, вязко-буферного подслоя и др., а также характеристик «упаковки» элементов шероховатости и/или растительности на подстилающей поверхности. Все эти слои интерпретируются как цепочка сопротивлений, включенных параллельно или последовательно, а скорость сухого осаждения выражается через результирующее сопротивление цепочки (см., например, работы Seinfeld, Pandis (2006), Fenger, Hertel, Palmgren (1998), Wesley (1989)). Несмотря на то что в последние годы появились публикации (в частности, Venkatram, Pleim (1999) и Kouznetsov, Sofiev (2012)), в которых подвергается сомнению универсальная применимость электрической аналогии, ее реальной альтернативы, которая была бы более обоснована с теоретической точки зрения, до настоящего времени не существует.

Следует подчеркнуть, однако, что при использовании электрической аналогии требуется располагать детальной информацией о внутренней структуре слоя шероховатости. В случае ее отсутствия для оценок сухого осаждения можно воспользоваться эмпирическими значениями v_d , определенными по данным натурных экспериментов. Обсуждение практических аспектов количественной оценки гравитационного и сухого осаждения аэрозолей также включено в предлагаемую работу.

2. Распространение аэрозолей в горизонтально однородном воздушном потоке

В рамках диффузионного приближения массовая концентрация c монодисперсной примеси определяется из решения уравнения атмосферной диффузии

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u_i - w_g \delta_{i3}) \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - \alpha c + S, \quad (1)$$

где u_i — компонент скорости воздушного потока вдоль оси x_i при $i = 1, 2, 3$ (в (1) по повторяющемуся индексу подразумевается суммирование), причем ось x_3 направлена по нормали к подстилающей поверхности (далее вместо x_i и u_i будут также использоваться обозначения x, y, z и u, v, w); w_g — скорость седиментации (гравитационного оседания); K_i — коэффициенты турбулентной диффузии в направлении x_i ; S — источниковый член; δ_{i3} — символ Кронекера; α — коэффициент вымывания примеси осадками (эффекты, связанные с вымыванием примесей осадками, рассматривались в ряде публикаций, например в работе Гениховича (1984), поэтому в данной работе полагается $\alpha = 0$). Аналогичное (1) уравнение выполняется при замене, например, массовой концентрации пыли c на ее счетную концентрацию n .

Уравнение (1) должно быть дополнено краевыми условиями, характеризующими начальное распределение концентрации пыли, а также граничными условиями, определяющими значения решения на границах области интегрирования (полупространства $x_3 > 0$). При этом краевые условия для концентрации «тяжелой» (пыли) и «легкой» (газообразной) примеси записываются одинаковым образом для всех границ (см., например, работу Берлянда (1975)) за исключением подстилающей поверхности, для которой они задаются в виде

$$\left(K_3 \frac{\partial c}{\partial x_3} - v_d c \right) \Big|_{x_3=0} = 0, \quad (2)$$

где v_d — скорость сухого оседания (при таком определении скорость седиментации не включается в v_d). Задача (1)—(2) может решаться непосредственно, если фигурирующие в этом уравнении коэффициенты предполагаются известными (заданными). В противном случае она должна дополняться задачей решения сис-

темы уравнений гидротермодинамики, описывающей турбулентные движения воздушного потока в атмосфере.

Для мелкодисперсной фракции атмосферной пыли, т. е. для частиц плотностью ρ и радиусом R , характеризующихся числом Рейнольдса не более 50—100, скорость гравитационного оседания может быть вычислена по формуле Стокса:

$$w_g = \frac{2}{9} \frac{\rho}{\rho_a} \frac{gR^2}{\nu}, \quad (3)$$

где ν и ρ_a — кинематическая вязкость и плотность атмосферного воздуха, а g — ускорение свободного падения. Для наиболее крупных частиц, к которым стоксовское приближение неприменимо, эта формула может быть откорректирована (см., например, работу Stout, Arya, Genikhovich (1995)), однако в рамках данной работы соответствующее обобщение не рассматривается.

С учетом специфики конкретных задач охраны воздушного бассейна от загрязнения, при анализе которых получены излагаемые в данной работе результаты, ограничимся рассмотрением стационарных процессов диффузии в пространственных масштабах в диапазоне от локального до «городского». В этом случае в уравнении (1) обращаются в нуль слагаемое с $\partial/\partial t$, а также (если система координат выбрана таким образом, что ось x_1 направлена вдоль приземного ветра) коэффициенты u_2 , u_3 и K_1 . Для оставшихся в уравнении (1) переменных и ненулевых коэффициентов, которые в случае горизонтально однородного воздушного потока могут зависеть только от x_3 , далее будут использоваться также обозначения $x_1 = x$, $x_3 = z$, $u_1 = U(z)$, $K_2 = K_y$, $K_3 = K_z(z)$.

Если рассматривать процессы распространения пыли в приземном слое, то коэффициенты в уравнении (1) можно определить из теории подобия Мони́на—Обухова (см. Монин, Яглом (1991)) как функции от безразмерного аргумента $\zeta = z/L$, где масштаб длины L определяется через динамическую скорость v_* , параметр плавучести g/T , турбулентный поток тепла Q (в приземном слое постоянен по высоте), плотность воздуха ρ_a (при тем-

пературе 15 °С примерно равна 1,22 кг/м³), теплоемкость воздуха при постоянном давлении c_p , а также постоянную Кармана κ по формуле

$$L = -\frac{v_*^3}{\kappa(g/T)(Q/c_p\rho_a)}. \quad (4)$$

Заменяв при этом (2) на граничное условие

$$c|_{z=z_1} = c_1, \quad (2')$$

где c_1 — заданное (например, измеренное) значение концентрации c на уровне $z = z_1$, можно получить горизонтально однородное решение (1) в виде

$$c = c_1 \exp\left[-\frac{w_g}{v_*}\psi(z)\right], \quad (5a)$$

где

$$\psi(z) = \frac{1}{\kappa}\left[f_T\left(\frac{z}{L}\right) - f_T\left(\frac{z_1}{L}\right)\right]. \quad (5b)$$

Здесь $f_T(z/L)$ — универсальная функция теории подобия, описывающая распределение с высотой температуры воздуха в термически стратифицированном приземном слое атмосферы.

Простейший вариант этого решения для случая нейтрально стратифицированного приземного слоя, когда $f_T(z/L)$ заменяется на $\ln z$, был получен в работе Баренблатта, Голицына (1973) (близкие по тематике вопросы рассматривались также в публикациях Баренблатта (1955) и Матвеева (1965)). Случай произвольной термической стратификации приземного слоя атмосферы рассматривался в работе Goroch, Burk, Davidson (1980), однако полученное при этом решение содержало ошибку, поскольку для нейтрально стратифицированного приземного слоя не переходило в решение Баренблатта—Голицына. Таким образом, можно полагать, что

правильное решение (5а)—(5б) рассматриваемой задачи для случая произвольной термической стратификации приземного слоя публикуется в предлагаемой работе впервые.

Формула (5а) описывает вертикальное распределение в приземном слое монодисперсной примеси, характеризующейся скоростью седиментации w_g . Если ее проинтегрировать по спектру скоростей w_g с весом, заданным их плотностью вероятностей $f_c(w_g)$, то можно получить выражение для вертикального профиля концентрации полидисперсной пыли. В частности, если $f_c(w_g)$ аппроксимировать гамма-распределением, т. е. положить

$$f_c(w_g) = \frac{1}{\Gamma(k)} \theta^k w_g^{k-1} e^{-\theta w_g}, \quad (6)$$

то этот вертикальный профиль описывается выражением

$$c(z) = \frac{c_1}{\left[1 + V^2 \frac{\bar{w}_g}{v_*} \psi(z) \right]^{1/V^2}}. \quad (7)$$

Здесь $\Gamma(k)$ — гамма-функция; \bar{w}_g — средняя по спектру скорость гравитационного осаждения; V — коэффициент вариации скорости осаждения, определяемый по формуле $V = \sigma_w / \bar{w}_g$.

В отсутствие информации о характеристиках термической стратификации приземного слоя атмосферы вместо выражения (7) можно пользоваться выражением (7') «для средних условий», заменив в (7) функцию $\psi(z)$ на $\ln(z/z_1)$:

$$\frac{c(z)}{c_1} = \left[1 + Ab \ln \left(\frac{z}{z_1} \right) \right]^{-1/b}, \quad (7')$$

где $b = V^2$; $A = \frac{\bar{w}}{kv_* \alpha_T} = 1,85 \frac{\bar{w}}{v_*}$; α_T — величина, обратная турбулентному числу Прандтля.

Рассмотрим теперь стационарную задачу о распространении пыли от точечного источника высотой H в горизонтально однородном воздушном потоке. В пренебрежении эффектами сухого осаждения эта задача исследована численно Берляндом (1975), причем ее размерность понижена за счет «перехода от точечного источника к линейному». Полученные при этом результаты были использованы при разработке действующей на момент подготовки данной работы инженерной методики расчета ОНД-86. В рамках этой методики, предназначенной для расчета полей мажорантных («максимальных») концентраций, такое пренебрежение вполне оправдано, но оно, к сожалению, ограничивает возможности обобщения ОНД-86 на расчет среднегодовых концентраций и, особенно, выпадений пыли на подстилающую поверхность. Ниже следует анализ общей задачи распространения пыли в горизонтально однородном потоке.

В целях обеспечения применимости получаемых результатов при корректировке формулы ОНД-86 для коэффициентов уравнения (1) примем те же самые параметризации, которые фактически были использованы Берляндом (1975):

$$U(z) = u_1 \frac{\ln \frac{z + z_0}{z_1 + z_0}}{z_0}, \quad (8a)$$

$$K_z(z) = K_1([z]_h + z_0). \quad (8б)$$

Здесь u_1 и K_1 — скорость ветра и коэффициент турбулентного обмена на уровне $z = z_1$, z_0 — параметр шероховатости, h — толщина приземного слоя воздуха, а срезка $[z]_h$ величины z значением h определяется формулами

$$[z]_h = z \text{ при } z \leq h, \quad (9a)$$

$$[z]_h = h \text{ при } z > h. \quad (9б)$$

Начальные (по маршевой переменной x) условия в задаче о линейном источнике будем задавать следующим образом:

$$c|_{x=0} = \frac{M}{U(z)} \delta(z-H). \quad (10)$$

Введем также масштабы для рассматриваемых переменных:

$$x = X\bar{x}; \quad z = Z\bar{z}; \quad c = C\bar{c}, \quad (11)$$

определяемые по формулам

$$X = \frac{U_1 h}{K_1 \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}, \quad (12a)$$

$$Z = h, \quad (12б)$$

$$C = \frac{M \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}{hu_1}. \quad (12в)$$

Тогда в безразмерных (с чертой сверху) переменных решаемая задача записывается следующим образом:

$$\ln \frac{\bar{z} + \bar{z}_0}{\bar{z}_0} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} - \bar{W} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{z}} = \frac{\partial}{\partial \bar{z}} ([\bar{z}]_1 + \bar{z}_0) \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{z}}, \quad (13a)$$

$$\bar{c}|_{\bar{x}=0} = \frac{\delta(\bar{z} - \bar{H})}{\ln \frac{\bar{H} + \bar{z}_0}{\bar{z}_0}}, \quad (13б)$$

$$\{[\bar{z}]_1 + \bar{z}_0\} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{z}} - \bar{V} \bar{c} \Big|_{\bar{z}=0} = 0, \quad (13в)$$

$$\bar{c} \Big|_{\bar{z} \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \quad (13г)$$

где $\bar{W} = W_g / K_1$, $\bar{V} = v_d / K_1$, $\bar{H} = H / h$, $\bar{z}_0 = z_0 / h$.

Далее при записи безразмерных переменных черта сверху будет опущена.

$$\text{Уравнение (13а) умножалось на функцию } f \equiv \exp\left(-\int_0^{\bar{z}} \frac{\bar{W}}{[\bar{z}]_1 + \bar{z}_0} d\bar{z}\right)$$

и преобразовывалось к дивергентному по z виду (см. работу Берлянда (1975)). Результирующая задача решалась численно методом сеток с использованием чисто неявной разностной схемы, а полученная разностная задача решалась методом прогонки.

Диапазоны, в которых варьировались безразмерные параметры, определяющие решение, представлены в табл. 1. В последней строке таблицы приведено число градаций n , на которые разбивался этот диапазон.

Таблица 1

Диапазоны вариации определяющих параметров задачи

	Параметр			
	\bar{H}	\bar{W}	\bar{V}	\bar{z}_0
Нижняя граница	10	0	0	0,00005
Верхняя граница	100	20	3	0,05
Число градаций	10	22	10	10

Как следует из табл. 1, всего было выполнено 22 000 вариантов численных расчетов, в результате которых затабулированы распределения приземных концентраций $c|_{z=0}$ и суммарный («сухое оседание плюс седиментация») поток примеси P на подстилающую поверхность. Кроме того, определялся масштаб распространения аэрозолей L , т. е. расстояние от источника, на котором «вся» (с заданной погрешностью) примесь, выброшенная из источника, выпадала на подстилающую поверхность.

Построенные таблицы могут быть непосредственно использованы при проведении инженерных расчетов загрязнения атмосферного воздуха. Дополнительный анализ позволил, в частности, выявить возможности построения их аналитических

аппроксимаций, что позволяет упростить вычислительные алгоритмы инженерных расчетов и, кроме того, согласуется с общей идеологией построения инженерных моделей расчета загрязнения воздуха, положенной в основу разработки ОНД-86.

Расчеты показали, в частности, что для максимальных значений приземной концентрации c_m можно подобрать такие значения показателя степени n , что комбинация $c'_m = c_m H^n$ практически не зависит от H в широком диапазоне изменения остальных определяющих параметров. В качестве примера для случая $z_0 = 0,00005$ и $V = 0$ на рис. 1 приведены графики c'_m и n , а на рис. 2 показан масштаб распространения L как функция W и H .

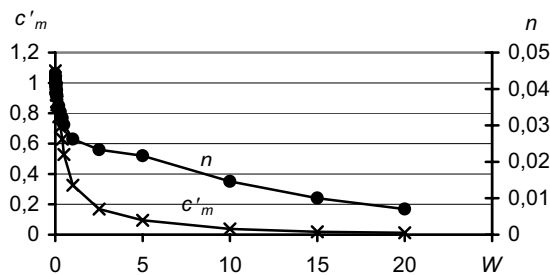


Рис. 1. Зависимость c'_m и n от безразмерной скорости осаждения W при $z_0 = 0,00005$ и $V = 0$.

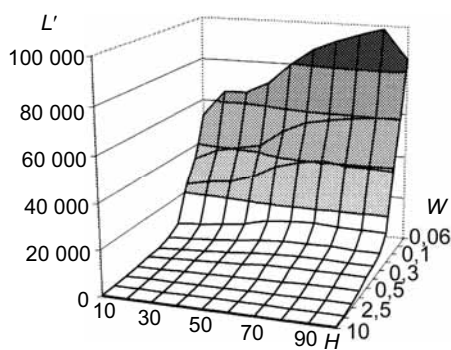


Рис. 2. Масштаб распространения аэрозолей L' при $z_0 = 0,00005$ и $V = 0$.

3. Задача о выпадении аэрозоля на планшет как пример учета пространственной неоднородности воздушного потока

Выражения для потоков примеси на выделенный участок подстилающей поверхности за счет соответственно гравитационного и сухого оседания могут быть получены путем интегрирования по этому участку функций $w_g c|_{z=0}$ и $v_d c|_{z=0}$. Для измерения этих потоков используются, в частности, планшеты, которые в воздушном потоке размещаются горизонтально на определенной высоте над подстилающей поверхностью (чтобы исключить, например, дополнительный занос пыли на планшет в результате ресуспензии). При этом, однако, воздушный поток за счет наличия в нем обтекаемого препятствия (планшета) искажается, что, вообще говоря, приводит и к искажению измеряемых потоков примеси.

Одна из первых количественных оценок возникающих при этом эффектов была опубликована в работе Берлянда, Гениховича, Масловой (1966). Ниже приводятся результаты, полученные в развитие намечавшихся в этой работе подходов. Для того чтобы ограничить объем вычислительной работы, мы рассматриваем здесь двумерный случай, т. е. пренебрегаем влиянием боковых границ планшета.

Для описания процесса выпадения аэрозолей на планшет с учетом искажения этим планшетом структуры воздушного потока используется следующая система дифференциальных уравнений в частных производных:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (14a)$$

$$u \frac{\partial b}{\partial x} + w \frac{\partial b}{\partial z} = \alpha_b \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial b}{\partial z} + K \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \frac{c_0 b^2}{K}, \quad (14б)$$

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + (w - w_g) \frac{\partial c}{\partial z} = \alpha_c \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (14в)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (14г)$$

$$\frac{\partial K}{\partial z} - \frac{K}{b} \frac{\partial b}{\partial z} = \kappa c_0^{1/4} b^{1/2}. \quad (14д)$$

Здесь начало координат помещено в наветренный край планшета; ось x направлена по ветру, а ось y — по вертикали; u и w — компоненты средней скорости воздушного потока вдоль осей x и y ; b — кинетическая энергия турбулентных пульсаций; c — массовая концентрация рассматриваемого аэрозоля; α_b и α_c — константы, которые принимаются равными α_T ; $c_0 = 0,046$.

Система (14а)—(14д) дополняется следующими краевыми условиями:

$$\text{при } x = 0: u = U_0; \quad b = B_0; \quad c = C_0, \quad (15а)$$

$$\begin{aligned} \text{при } z = 0: u = 0; \quad w = 0; \quad \partial b / \partial z = 0; \\ K = \kappa c_0^{1/4} z_0 b^{1/2}; \quad \alpha_c K \partial c / \partial z = v_d c, \end{aligned} \quad (15б)$$

$$\text{при } z \rightarrow \infty: u \rightarrow U_0; \quad b \rightarrow B_0; \quad c \rightarrow C_0. \quad (15в)$$

В рамках приведенной постановки использованы следующие упрощающие предположения:

— поскольку пограничный слой, формирующийся при обтекании планшета воздушным потоком, является тонким, изменениями с высотой характеристик набегающего потока можно пренебречь;

— по этой же причине можно не учитывать в рассматриваемой задаче эффекты, связанные с термической стратификацией воздушного потока;

— с целью уменьшения объема вычислений в задаче не учитываются возможные краевые эффекты, обусловленные конечными размерами планшета в поперечном воздушному потоку направлении (т. е. в направлении оси y).

Для сокращения числа параметров, от которых зависит решение, в задаче (14а)—(14д), (15а)—(15в) осуществляется переход к безразмерным переменным:

$$u = U_0 \bar{u}; \quad b = B_0 \bar{b}; \quad w = W \bar{w}; \quad K = K_0 k; \quad c = C_0 \bar{c}; \quad x = L \bar{x}; \quad z = Z \bar{z}, \quad (16)$$

где L — длина планшета; U_0 , B_0 и C_0 — значения скорости ветра, энергии турбулентности и концентрации аэрозоля в набегающем потоке (определяются по данным наблюдений и в масштабах рассматриваемого процесса принимаются постоянными по высоте). Для задания остальных масштабов используются следующие формулы:

$$K_0 = B_0 L / U_0, \quad (17a)$$

$$Z = B_0^{1/2} L / U_0, \quad (17б)$$

$$W = B_0^{1/2}. \quad (17в)$$

Преобразованная в безразмерные переменные задача имеет следующий вид:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{z}} = \frac{\partial}{\partial \bar{z}} k \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{z}}, \quad (18a)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{b}}{\partial \bar{x}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{b}}{\partial \bar{z}} = \alpha_b \frac{\partial}{\partial \bar{z}} k \frac{\partial \bar{b}}{\partial \bar{z}} + \mu k \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{z}} \right)^2 - \frac{c_0 \bar{b}^2}{k}, \quad (18б)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} + (\bar{w} - \bar{w}_g) \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{z}} = \alpha_c \frac{\partial}{\partial \bar{z}} k \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{z}}, \quad (18в)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} = 0, \quad (18г)$$

$$\frac{\partial k}{\partial \bar{z}} - \frac{k}{\bar{b}} \frac{\partial \bar{b}}{\partial \bar{z}} = \kappa c_0^{1/4} (\bar{b})^{1/2}, \quad (18д)$$

где

$$\mu = U_0^2 / B_0. \quad (18e)$$

При этом должны выполняться следующие краевые условия:

$$\text{при } \bar{x} = 0: \bar{u} = 1; \quad \bar{b} = 1; \quad \bar{c} = 1, \quad (19a)$$

$$\text{при } \bar{z} = 0: \bar{u} = 0; \quad \bar{w} = 0; \quad \partial \bar{b} / \partial \bar{z} = 0;$$

$$k = \kappa c^{1/4} \bar{z}_0 (\bar{b})^{1/2}; \quad \alpha_c k \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{z}} = \bar{v}_d \bar{c}, \quad (19б)$$

$$\text{при } z \rightarrow \infty: \bar{u} \rightarrow 1; \quad \bar{b} \rightarrow 1; \quad \bar{c} \rightarrow 1. \quad (19в)$$

Здесь

$$\bar{w}_g = w_g / B_0^{1/2} = \mu^{1/2} w_g / U_0 = \mu^{1/2} \tau,$$

$$\bar{v}_d = v_d / B_0^{1/2} = \mu^{1/2} v_d / U_0 = \mu^{1/2} \xi,$$

причем

$$\tau = w_g / U_0; \quad \xi = v_d / U_0.$$

Таким образом, безразмерные решения задачи зависят от двух безразмерных аргументов: \bar{x} и \bar{z} , а также от четырех безразмерных параметров: μ , τ , ξ и \bar{z}_0 .

Суммарный поток аэрозоля P на планшет длиной L и «единичной шириной» S определяется по формуле

$$P = (w_g + v_d) S \int_0^L c|_{z=0} dx. \quad (20)$$

Отсюда находим

$$P = C_0 U_0 L S (\xi + \tau) \mu^{1/2} Q, \quad (21a)$$

где

$$Q = \int_0^1 \bar{c}|_{\bar{z}=0} d\bar{x}. \quad (21б)$$

Решения приведенной системы как функции безразмерных координат и параметров μ , τ , ξ (или μ , \bar{v}_d , \bar{w}_g) и \bar{z}_0 , а также со-

ответствующие им значения Q были определены численно. Характер изменения с безразмерной высотой над планшетом безразмерной концентрации примеси иллюстрируется на рис. 3, который соответствует значениям $\bar{w}_g = 0,005$; $v_d = 0,005$; $\bar{x} = 0,02$.

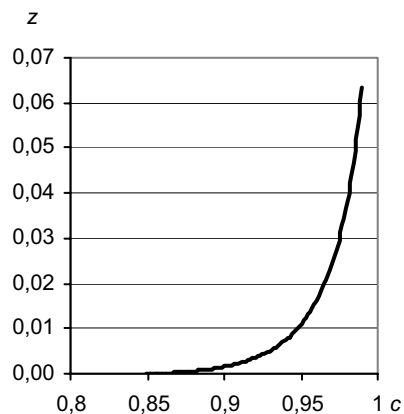


Рис. 3. Пример расчетного вертикального распределения безразмерной концентрации примеси (c) над планшетом.

4. Экспериментальная проверка полученных зависимостей

Экспериментальная проверка уравнения (7') проводилась на следующих данных.

1. Вертикальные распределения концентрации пыли кукурузы, полученные при измерениях на высоте 3; 3,75; 4,5 и 6 м (Chamecki et al., 2007). Измерения проводились в штате Мериленд, США, в июле 2004 г. Поле, размером около 900×300 м, на котором проводились эксперименты, расположено в районе с плоской поверхностью. Концентрация пыли измерялась примерно в середине поля. Для анализа были выбраны периоды с высоким содержанием пыли в воздухе. 16 июля 2004 г. было проведено восемь циклов измерений. В табл. 2 приведены зависимости от высоты z отношения концентрации c на уровне z к концентрации c_1 на уровне $z_1 = 3$ м, для средних и максимальных по восьми замерам значений концентрации пыли.

2. Экспериментальные данные В. А. Ионина (1989, 2010), полученные в ходе полевых работ по исследованию загрязнения атмосферы и ее коррозионной активности на метеопосту Имчжадонри (КНДР). На этом посту производился отбор проб полидисперсной пыли. В сентябре и декабре 1990 г. пробы отбирались на уровнях 1,5; 10; 20 и 26 м от поверхности.

В табл. 2 приведены отношения $c(z)/c_1$ для средних и максимальных значений концентрации пыли за весь период наблюдений.

Таблица 2

Измеренные вертикальные профили отношения $c(z)/c_1$

z м	Мэриленд, США		Имчжадонри, КНДР	
	Макс.	Среднее	Макс.	Среднее
1,5	—	—	1,00	1,00
3	1,00	1,00	—	—
3,75	0,67	0,73	—	—
4,5	0,50	0,52	—	—
6	0,30	0,30	—	—
10	—	—	0,08	0,25
20	—	—	0,07	0,25
26	—	—	0,05	0,17

К сожалению, в нашем распоряжении не было информации, которая позволила бы задавать коэффициенты A и b в (7'). Поэтому они определялись путем минимизации среднего квадрата невязки между результатами измерений и соответствующими расчетными значениями $c_1/c(z)$ (т. е. с помощью нелинейной версии метода наименьших квадратов), а затем с использованием приведенных выше соотношений восстанавливались значения коэффициента вариации V и соотношения \bar{w}/v_* . Полученные значения V и \bar{w}/v_* приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Определяющие параметры для расчета вертикального распределения
концентрации аэрозольных частиц**

Параметр	Мэриленд, США		Имчжадонри, КНДР	
	Макс.	Среднее	Макс.	Среднее
V	0,0017	0,0017	0,79	0,98
\bar{w}/v_*	0,729	0,936	0,57	3,0

Восстановленные в соответствии с полученными параметрами графики отношения $c(z)/c_1$ от z приведены на рис 4.

Сводные корреляционные графики измеренных и рассчитанных отношений $c(z)/c_1$ для средних и максимальных значений концентрации представлены на рис. 5 *а* и *б* соответственно.

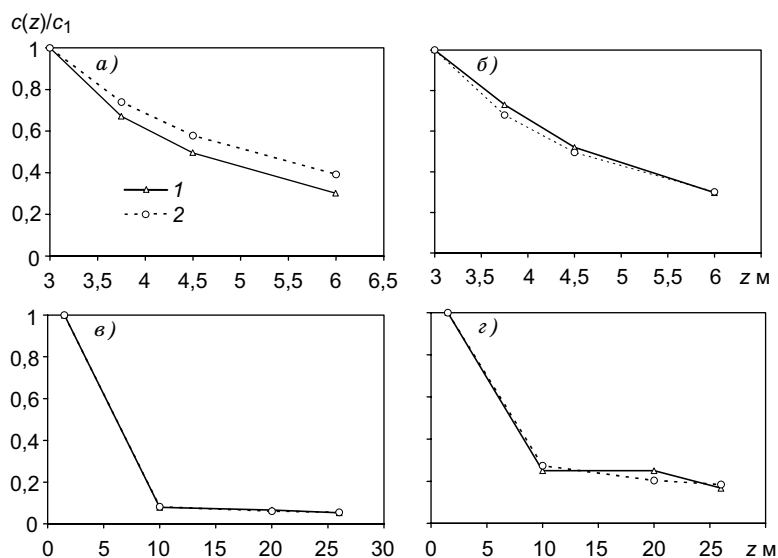


Рис. 4. Измеренные (1) и рассчитанные (2) максимальные (а, в) и средние (б, г) концентрации аэрозоля по данным измерений в США (а, б) и КНДР (в, г).

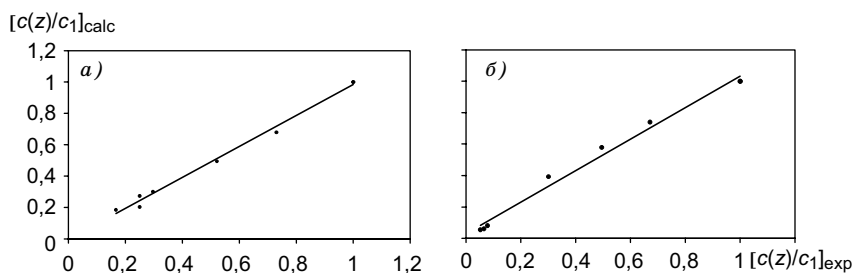


Рис. 5. Корреляционные графики измеренных и рассчитанных значений отношения $c(z)/c_1$ для средних (а) и максимальных (б) значений концентрации.

В табл. 4 представлены уравнения регрессии и соответствующие им коэффициенты детерминации, характеризующие связь между результатами расчетов и измерений.

Из приведенных результатов видно, что формула для вертикального профиля полидисперсного аэрозоля (7') достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментов.

Строго говоря, формулы в данной работе относятся только к «сухому» (т.е. необводненному) аэрозолю, например к сухой пыли. В ряде случаев, однако, следует учитывать, что аэрозоли морского происхождения являются гигроскопическими и, следовательно, могут обмениваться влагой с окружающим воздухом. Результирующая скорость гравитационного оседания таких частиц зависит от содержания водяного пара в атмосферном воздухе. В данной связи можно упомянуть работы Бортковского (1983), Бортковского и др. (1974), Fitzgerald (1975), Gong et al. (1997a,b),

Таблица 4

Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации, соответствующие данным, представленным на рис. 3

Концентрация аэрозоля	Уравнение регрессии	R^2
Средняя	$[c(z)/c_1]_{\text{calc}} = 0,986[c(z)/c_1]_{\text{exp}} - 0,0021$	0,9934
Максимальная	$[c(z)/c_1]_{\text{calc}} = 1,0031[c(z)/c_1]_{\text{exp}} + 0,0291$	0,9888

Grini et al. (2002), Lewis, Schwartz (2005), Sofiev et al. (2010). В некоторых из этих работ предложены эмпирические аппроксимационные формулы для оценки эффектов обводнения аэрозолей. В настоящей работе, однако, будут использоваться следующие простейшие формулы, приведенные для морских аэрозолей в работе Goroch, Burk, Davidson (1980) и, по сути, заимствованные из работы Kasten (1969):

$$R = R_d(1 - f)^{-0,25}, \quad (22)$$

$$f = RH / 100 \quad \text{при } RH \leq 99,5 \%, \quad (23a)$$

$$f = 0,995 \quad \text{при } RH > 99,5 \%, \quad (23b)$$

$$\rho = \rho_w + (\rho_d - \rho_w)(1 - f)^{0,75}. \quad (24)$$

Здесь R_d — радиус частиц сухого аэрозоля, RH — относительная влажность воздуха, ρ_d и ρ_w — плотность частиц сухого аэрозоля и воды.

Необходимо подчеркнуть, что с точки зрения практических приложений оценка выпадения хлоридов, которые являются гигроскопичными, представляет наибольший интерес и является одной из задач соответствующих инженерных изысканий. Действительно, по данным многочисленных публикаций (см., например, работу Петренчук (1979)) коррозионная активность атмосферы и соответственно скорость коррозионного разрушения при прочих равных условиях связаны именно с величиной выпадения хлоридов на корродирующие поверхности. Легко понять также, что выпадение гигроскопических аэрозолей зависит от более широкого набора внешних параметров, чем в случае необводненного аэрозоля, и потому является более сложной задачей. Именно поэтому в настоящей работе проверка применимости полученных результатов выполнена с использованием хлоридов «в качестве трассера».

Приведенная в работе Seinfeld, Pandis (2006) информация свидетельствует о том, что максимум в спектре счетной концентрации

хлоридов приходится на размеры порядка 1 мкм. При этом основная масса хлоридов, в случае если они не являются обводненными, относится к диапазону частиц 5—10 мкм, а их модальный размер примерно равен 8 мкм. Воспользовавшись для оценок значением плотности хлоридов $\rho = 2,165 \text{ г/см}^3$ (плотность поваренной соли), получим, что скорость гравитационного оседания «сухих» хлоридов составляет примерно 0,44 см/с, т. е. 0,0044 м/с. Соответствующие скорости гравитационного оседания при различных значениях относительной влажности оцениваются по формулам (22)—(24), из которых, в частности, следует, что за счет изменения относительной влажности воздуха скорость гравитационного оседания может изменяться примерно в шесть раз.

Экспериментальная проверка формулы для расчета выпадения хлоридов на подстилающую поверхность проводилась с использованием результатов экспедиционных наблюдений, проводившихся В. А. Иониным (1989, 2010) в районах предполагаемого строительства атомных электростанций (АЭС). При этом учитывалась зависимость (22)—(24) скорости седиментации от относительной влажности. Массив использованных данных измерений охарактеризован в табл. 5.

В эксперименте «Куба—Хурагуа» определение концентрации хлоридов в пробах аэрозоля проводилось с февраля по ноябрь 1980 г. с разбивкой на группы с учетом направления ветра (отбор проб производился на фильтры АФА один раз в день на одном из пунктов наблюдений с последующим осреднением результатов). В период с 17 января по 3 февраля 1981 г. для измерения выпадений хлоридов на высоте 1,5 м были установлены предварительно вымытые электроизоляторы (DPRK-33000). По окончании экспозиции осевшая на изоляторах пыль была смыта дистиллированной водой, после чего был проведен химический анализ полученного раствора. На такой способ измерения выпадений хлоридов в последнем столбце табл. 5 указывает слово «электроизоляторы». Как следует из таблицы, этот способ применялся также в экспедиции в Ливию.

Следует отметить, что данные синхронных измерений выпадения и концентрации хлоридов, а также значения относитель-

Таблица 5

Экспедиционные наблюдения В. А. Ионина за выпадением хлоридов

Страна	Пункт мониторинга	Период наблюдений	Способ измерений выпадения
Куба	Хурагуа, 1500 м от берега	17.01—03.02.1981 г.	Электроизоляторы
Куба	Ольгин, 500 м от берега	05—08.1988 г.	Планшет
Куба	Ольгин, 1132 м от берега	05—08.1988 г.	Планшет
Иран	Бушер, 150 км от Средиземного моря	04.1999 г.	Планшет
Ливия	Район ДАЭС, 30 м от берега	03.1980 г. — 03.1981 г.	Электроизоляторы

ной влажности не были приведены. Поэтому при дальнейшей обработке использовались средние значения выпадения хлоридов за указанные две недели и концентрации хлоридов в атмосфере за указанные выше девять месяцев, а также климатическое среднегодовое значение относительной влажности для расположенной на Кубе станции Ольгин, равное 80 %.

В эксперименте «Куба—Ольгин» отбор проб воздуха для определения содержания коррозионно активных примесей производился при помощи аспирационного устройства АФА в течение 60 минут при направлении ветра со стороны Атлантического океана с апреля по август 1988 г. На постах проводились наблюдения за интенсивностью осадения хлоридов из атмосферы на планшеты (май—август 1988 г.), состоящие из пяти фильтров АФА, горизонтально закрепленных на высоте 1,5 м (на такую технологию проведения измерений указывает слово «планшет» в последнем столбце табл. 5). Среднегодовое значение относительной влажности для рассматриваемого района составляет 80—84 %, причем в период дождей (март—октябрь) ее среднемесячные значения достигают 86—90 %.

Наблюдения за концентрацией хлоридов в атмосферном воздухе в Бушере (Иран) были организованы в конце мая 1999 г. на расстоянии 150 км от Средиземного моря. При этом пробы отбирались один раз в сутки, а время отбора проб составляло от 60 до 90 мин. Наблюдения же за выпадениями хлоридов были организованы в апреле 1999 г. по окончании сезона дождей. Данные об относительной влажности в период проведения наблюдений отсутствуют. С учетом того что сезон дождей уже закончился, при обработке было использовано значение относительной влажности 60 %.

Измерения в Ливии проводились в районе предполагаемого строительства Двухцелевой атомной станции и опреснительного комплекса (ДАЭС). Концентрации коррозионно активных примесей в атмосфере определялись с марта 1979 г. по декабрь 1981 г., а также в октябре—ноябре 1982 г. Измерения выпадения на изоляторы проводились с марта 1980 г. по март 1981 г.

Из вышесказанного следует, что измерения концентрации и выпадения хлоридов проводились несинхронно, а необходимые для проведения расчетов значения относительной влажности нам не были известны, так что определяющие параметры, от которых зависит результат модельных расчетов выпадения хлоридов, пришлось «восстанавливать из дополнительных соображений», т. е. с неизбежной погрешностью. В такой ситуации расчеты по представленной модели, без сомнения, также должны характеризоваться существенными погрешностями. Тем не менее в расчетах мы учли зависимость скорости гравитационного оседания от относительной влажности. При этом было установлено, что между результатами расчетов и данными измерений выпадения хлоридов имеется достаточно тесная корреляционная связь (коэффициент детерминации $R^2 = 0,8656$), а угловой коэффициент в уравнении регрессии ($y = 1,12x - 2,13$) отличается от единицы всего на 12 %. С учетом неопределенности в задании входных параметров для расчета такое согласие результатов расчета и измерений следует признать удовлетворительным.

5. Заключение

Атмосферные аэрозоли играют важную роль в цепочке физических механизмов, определяющих загрязнение атмосферного воздуха, воздействие на окружающую среду и здоровье людей, изменение климата Земли, генерацию облаков и осадков, формирование атмосферных электрических полей и др. Регистрация характеристик атмосферных аэрозолей предусмотрена в качестве обязательного элемента программами инженерных изысканий, предшествующих строительству ряда объектов промышленности и энергетики. Этим можно объяснить заметную интенсификацию научно-исследовательской активности в области изучения атмосферных аэрозолей, которая наблюдается в настоящее время.

Как следует из приведенных материалов, на основе аналитического или численного интегрирования уравнения атмосферной диффузии в работе получен ряд новых результатов, относящихся к описанию распределений атмосферных аэрозолей в приземном и пограничном слое атмосферы, а также их выпадений на подстилающую поверхность. Их применимость подтверждена с использованием уникального по полноте и объему массива данных натуральных измерений характеристик атмосферных аэрозолей, проводившихся как в России, так и за рубежом в рамках инженерных изысканий в районах предполагаемого строительства атомных электростанций. Это позволяет использовать указанные результаты, в частности, при дальнейшем развитии методов и моделей расчета загрязнения атмосферы и оценки нагрузки на окружающую среду.

Существенный прогресс в области математического моделирования атмосферных аэрозолей связан с возрастанием доступных вычислительных мощностей, что позволяет включать в модели атмосферных процессов решение «в лоб» задач аэрозольной динамики. Представляется, однако, что при всей перспективности такого подхода он не является единственно возможным, особенно, если речь идет о решении массовых инженерных задач, и что в данной связи имеет смысл работать также со сравнительно простыми малопараметрическими моделями. Можно надеяться,

что получаемые при этом результаты в определенной степени будут полезны и при дальнейшем развитии работ по аэрозольной динамике, в частности при использовании в качестве «тестовых примеров».

Что же касается практических приложений, то для решения инженерных задач в сегодняшней ситуации малопараметрические модели распространения атмосферных аэрозолей, без сомнения, являются предпочтительными, хотя бы потому что ими можно пользоваться в реальной инженерной практике. Представленные в настоящей работе результаты позволяют надеяться на то, что в ближайшее время появится новое поколение таких малопараметрических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алоян А. Е. (2002). Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Курс лекций. — М.: Изд-во ИВМ РАН. 200 с.

Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха (1962) / Под ред. А. С. Мони-на. — М.: Изд-во иностр. лит. 512 с.

Баренблатт Г. И. (1955). О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке, занимающем полупространство или плоский канал конечной глубины // Прикладная математика и механика. Т. 19, № 1. С. 61—88.

Баренблатт Г. И., Голицын Г. С. (1973). Локальная структура развитых пыльных бурь / Препринт. — М.: Изд-во МГУ. 44 с.

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

Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Маслова Г. Е. (1966). К теории зависимости между концентрацией аэрозолей в атмосфере и их потоками на горизонтальный планшет // Труды ГГО. Вып. 185. С. 3—14.

Берлянд М. Е., Оникул Р. И. (1971). К обобщению теории рассеивания промышленных выбросов в атмосферу // Труды ГГО. Вып. 234. С. 3—27.

Бортковский Р. С., Бютнер Э. К., Малевский С. П., Преображенский Л. Ю. (1974). Процессы переноса вблизи поверхности раздела океан—атмосфера. — Л.: Гидрометеиздат. 238 с.

Бортковский Р. С. (1983). Тепло- и влагообмен атмосферы и океана при шторме. — Л.: Гидрометеиздат. 159 с.

Бютнер Э. К. (1978). Динамика приповерхностного слоя воздуха. — Л.: Гидрометеиздат. 156 с.

Генихович Е. Л. (1984). Оценка количества примесей, вымываемых осадками из дымового факела // Труды ГГО. Вып. 479. С. 45—51.

Грин Х., Лейн В. (1972). Аэрозоли — пыли, дымы и туманы / Пер. с англ. под. ред. Н.А. Фукса. Изд. 2-е. — Л.: Химия. 428 с.

Ивлев Л. С., Довгалюк Ю. А. (1999). Физика атмосферных аэрозольных систем. — СПб: Изд-во НИИХ СПбГУ. 194 с.

Ионин В. А. (1989). Исследование коррозионно активных примесей атмосферы в различных физико-географических районах / Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — СПб: изд. ГГО. 24 с.

Ионин В. А. (2010). Рабочие материалы изучения коррозионно активных атмосферных примесей.

Каипов И. В., Семенов О. Е., Шапов А. П. (1985). Измерения переноса песка на осушенной части дна Аральского моря во время песчаных бурь // Труды КазНИИ. Вып. 85. С. 3—12.

Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И., Поздняков Д. В. (1983). Атмосферный аэрозоль. — Л.: Гидрометеиздат. 224 с.

Левич В. Г. (1959). Физико-химическая гидродинамика. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 699 с.

Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий. Общесоюзный нормативный документ ОНД-86 (1987) / Под ред. М. Е. Берлянда, Н. К. Гасилиной, Е. Л. Гениховича, Р. И. Оникула, В. А. Глухарева. — Л.: Гидрометеиздат. 92 с.

Матвеев Л. Т. (1965). Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 876 с.

Монин А. С., Яглом А. М. (1992). Статистическая гидромеханика. Т. 1. — СПб: Гидрометеиздат. 693 с.

Ньистадт Ф. Т. М., ван Дон Х. (1985). Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. — Л.: Гидрометеиздат. 351 с.

Оникул Р. И., Яковлева Е. А. (2008). Аналитическая аппроксимация численного решения уравнения атмосферной диффузии тяжелой примеси // Труды ГГО. Вып. 557. С. 184—196.

Петренчук О. П. (1979). Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. — Л.: Гидрометеиздат. 263 с.

Райст П. (1987). Аэрозоли: введение в теорию. — М.: Мир. 278 с.

Селезнева Е. С. (1966). Атмосферные аэрозоли. — Л.: Гидрометеиздат. 174 с.

Семенов О. Е. (1977). Закономерности в вертикальной изменчивости переноса мелкого песка при пыльных бурях // Труды КазНИГМИ. Вып. 63. С. 3—17.

Фукс Н. А. (1961). Успехи механики аэрозолей. — М.: Изд-во АН СССР. 158 с.

Хуришудян Л. Г. (2002). О распространении тяжелой примеси от наземных источников / В сб.: Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха. Под ред. М. Е. Берлянда. — СПб: Гидрометеоздат, с. 100—108.

Юнге Х. (1965). Химический состав и радиоактивность атмосферы / Пер. с англ. под ред. Ю. А. Израэля. — М.: Мир. 424 с.

Bowker G. E., Gillette D. A., Bergametti G., Marticorena B., Heist D. K. (2007). Sand flux simulation at a small scale over a heterogenous Mesquite Area of the Northern Chihuahuan Desert // J. Appl. Met. & Clim. V. 46, doi: 10.1175/JAM2537.1. P. 1410—1422.

Chamecki M., van Hout R., Meneveau C., Parlange M. B. (2007). Concentration profiles of particles settling in the neutral and stratified atmospheric boundary layer // Boundary-Layer Met., 125:25-38.

Fenger J., Hertel O., Palmgren F. (eds) (1998). Urban air pollution — European aspects. — Kluwer Acad. Publ. 482 p.

Fitzgerald J. W. (1975). Approximation formulas for the equilibrium size of an aerosol particle as a function of its dry size and composition and the ambient relative humidity // J. Appl. Met. V. 14. P. 1044—1049.

Gillette D., Blifford I. H., Fryrear D. W. (1974). The influence of wind velocity on the size distribution of the aerosols generated by the wind erosion of soils // J. Geoph. Res. V. 79, No. 27. P. 4068—4075.

Gong S. L., Barrie L. A., Blanchet J.-P. (1997a). Modeling sea-salt aerosols in the atmosphere 1. Model development // J. Geoph. Res. V. 102, No. D3. P. 3805—3818.

Gong S. L., Barrie L. A., Prospero J. M., Savoie D. L., Ayers G. P., Blanchet J.-P., Spacek L. (1997b). Modeling sea-salt aerosols in the atmosphere 2. Atmospheric concentrations and fluxes // J. Geoph. Res. V. 102, No. D3. P. 3819—3830.

Goroch A. K., Burk S., Davidson K. L. (1980). Stability effects on aerosol size and height distribution // Tellus. V. 32, No 3. P. 245—250.

Grini A., Myhre G., Sundet., Isaksen I. S. A. (2002). Modeling the annual cycle of sea salt in the global 3D model Oslo CTM2: concentrations, fluxes, and radiative impact // J. Climate. V. 15. P. 1717—1730.

Kasten F. (1969). Visibility forecast in the phase of pre-condensation // Tellus. V. 21. P. 631—635.

Kouznetsov R., Sofiev M. (2012). A methodology for evaluation of vertical dispersion and dry deposition of atmospheric aerosols // J. Geoph. Res. V. 117, D01202. doi: 10.1029/2011JD016366.

Lewis R. L., Schwartz S. E. (2005). Sea salt aerosol production: mechanisms, methods, measurements, and models: a critical review // Geophys. Monogr. Ser. V. 152. AGU Publ. 413 p.

Seinfeld J. H., Pandis S. N. (2006). Atmospheric chemistry and physics. — John Wiley&Sons Inc., 1203 p.

Sofiev M., Soares J., Prank M., de Leeuw G., Kukkonen J. (2010). A regional-to-large-scale model of emission and transport of sea salt particles in the atmosphere / In: Steyn D.G., Rao T. (eds). Air Pollution Modelling and Its Applications XX.

Stout J. E., Arya S. P., Genikhovich E. L. (1995). The effect of nonlinear drag on the motion and settling velocity of heavy particles // *J. Atm. Sci.* V. 52, No 11. P. 3836—3848.

Venkatram A., Pleim J. (1999). The electrical analogy does not apply to modeling dry deposition of particles // *Atm. Environ.* V. 33. P. 3075—3076.

Wesley M. L. (1989). Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regionalscale numerical models. — *Atm. Environ.* V. 23, No. 6. P. 1293—1304.

Wilson R., Spengler J. D. (1996). Particles in our air: concentrations and health effects. — Harvard School of Public Health. 259 p.

УДК 551.510.42

**К АНАЛИЗУ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЫСОКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ВОЗДУШНОГО БАСЕЙНА МОСКВЫ ЛЕТОМ 2010 г.**

*Е. Л. Генихович¹, А. В. Киселев², И. В. Смирнова¹,
С. С. Чичерин¹*

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: ego@main.mgo.rssi.ru

² Северо-Западный государственный медицинский университет
им. И. И. Мечникова
191015, г. Санкт-Петербург, ул. Кирочная, 41
E-mail: 191015:anatol.kiselev@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2012

В июле—августе 2010 г. в связи с неблагоприятными погодными условиями и лесными пожарами в Москве были зарегистрированы аномально высокие уровни загрязнения воздуха. Одновременно в печати появились сообщения о существенном (до полутора—двух раз) увеличении в этот период смертности населения. Со ссылкой на информацию начальника управления ЗАГС г. Москвы И. Н. Муравьевой 3 января 2011 г. агентство РИА Новости сообщило, что по сравнению с 2009 г. в целом за 2010 г. смертность в Москве увеличилась на 6054 человек, т. е. на 4,5 %.

Предположение о том, что указанное увеличение смертности было связано с ростом загрязнения воздуха представляется вполне естественным. Однако ответ на вопрос о том, какие именно из вредных примесей, концентрации которых заметно возросли в указанный период, были ответственны за столь негативные последствия, оказался неочевидным. В частности, рядом авторов было высказано предположение о том, что причиной этих последствий стали высокие концентрации тропосферного (приземного) озона.

Для обсуждения соответствующей проблематики 22—23 июня 2011 г. в Тарусском филиале института общей физики им. А. М. Прохорова РАН состоялось совещание-семинар по про-

блемам мониторинга и нейтрализации вредного влияния приземного озона. Настоящая работа основана на материалах доклада, представленного авторами на этом совещании-семинаре. Как будет видно из дальнейшего изложения, представленные результаты позволяют предположить, что негативные последствия загрязнения воздушного бассейна Москвы в 2010 г. в плане острого воздействия обусловлены, в первую очередь, высокими концентрациями мелкодисперсного аэрозоля, а в плане хронического воздействия — высокими концентрациями формальдегида.

Особенности загрязнения воздушного бассейна Москвы летом 2010 г. обсуждались в ряде работ (см., например, работы Еланского и др. (2011), Звягинцева и др. (2011)). Основная часть использованной в них первичной информации была получена с помощью двух действующих в Москве систем инструментального мониторинга. Работу одной из них (функционирующей в режиме ручного отбора и последующего химического анализа проб воздуха) обеспечивает Московский ЦГМС-Р, т. е. территориальное подразделение гидрометслужбы. В 2010 г. эта система включала 16 постов наблюдений и обеспечивала регистрацию концентрации 17 примесей. Вторая система, которую эксплуатирует ГПБУ «Мосэкомониторинг», является автоматической и организована Правительством Москвы. В 2010 г. она включала 37 станций мониторинга и в целом по Москве обеспечивала регистрацию 22 «показателей, характерных для выбросов городских источников» (Кульбачевский, 2011).

Дополнительно в указанных выше публикациях, а также в работе Звягинцев и др. (2010) рассматриваются данные измерений концентрации приземного озона, выполнявшихся такими научными организациями, как Институт физики атмосферы РАН, Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета и др. Материалы наблюдений Московского ЦГМС-Р и Мосэкомониторинга обобщены в Ежегоднике (2011) и работе Кульбачевского (2011) соответственно. Именно эти данные анализируются в настоящей работе.

Результаты наблюдений свидетельствуют о том, что для ряда вредных примесей в Москве имел место «синхронный» годовой ход концентраций, в котором максимальное загрязнение воздуха отмечалось в июле — августе 2010 г. В качестве иллюстрации на рис. 1 показаны значения максимальных за каждый месяц 2010 г.

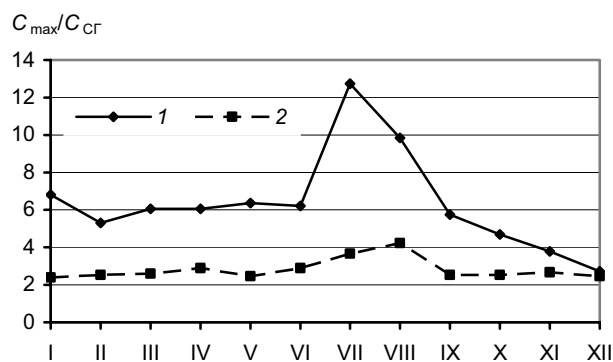


Рис. 1. Годовой ход максимальных за месяц (C_{\max}) разовых концентраций диоксида азота (1) и формальдегида (2), нормированных на их среднегодовые концентрации ($C_{\text{ср}}$).

разовых концентраций (C_{\max}) диоксида азота и формальдегида, нормированных на среднегодовую концентрацию ($C_{\text{ср}}$) соответствующей примеси. Сопоставление аналогичных данных для остальных примесей показывает, что наибольшие амплитуды годового хода отмечались для тех загрязняющих веществ, источники или предшественники которых связаны с горением.

Максимальные разовые и средние за 2010 г. значения зарегистрированных по данным двух систем мониторинга в Москве концентраций восьми загрязняющих примесей приведены в табл. 1, где PM10 и PM2.5 — концентрации мелкодисперсного аэрозоля с эффективным аэродинамическим диаметром менее 10 и 2,5 мкм соответственно.

Помимо включенных в табл. 1 примесей, в последующем анализе были использованы также концентрации аммиака, сероводорода и фенола. Значения концентраций в табл. 1 могут сравниваться с приведенными в табл. 2 максимальными разовыми и среднесуточными предельно допустимыми концентрациями в атмосферном воздухе населенных мест (ПДК_{МР} и ПДК_{СС} соответственно), которые относятся к периоду осреднения 20—30 мин и к длительным периодам осреднения. Следует подчеркнуть, однако, что для PM10 и

Таблица 1

Максимальные разовые (C_{\max}) и среднегодовые ($C_{\text{СГ}}$) концентрации вредных примесей в воздушном бассейне Москвы в 2010 г.

Примесь	C_{\max}	$C_{\text{СГ}}$	Примесь	C_{\max}	$C_{\text{СГ}}$
NO_2 , мкг/м ³	840	39	Озон, мкг/м ³	263	32
NO , мкг/м ³	215	38	PM_{10} , мкг/м ³	1680	44
Формальдегид, мкг/м ³	60	15	$\text{PM}_{2.5}$, мкг/м ³	—	21
CO , мг/м ³	37,5	0,75	Бенз(а)пирен, нг/м ³	—	1,54

Таблица 2

Максимальные разовые ($\text{ПДК}_{\text{МР}}$) и среднесуточные ($\text{ПДК}_{\text{СС}}$) предельно допустимые концентрации рассматриваемых вредных примесей в атмосферном воздухе населенных мест

Примесь	$\text{ПДК}_{\text{МР}}$	$\text{ПДК}_{\text{СС}}$	Примесь	$\text{ПДК}_{\text{МР}}$	$\text{ПДК}_{\text{СС}}$
NO_2 , мкг/м ³	200	40	Озон, мкг/м ³	160	30
NO , мкг/м ³	400	60	PM_{10} , мкг/м ³	300	60
Формальдегид, мкг/м ³	35	3	$\text{PM}_{2.5}$, мкг/м ³	160	35
CO , мг/м ³	5	3	Бенз(а)пирен, нг/м ³	—	1

$\text{PM}_{2.5}$ среднегодовые концентрации должны сопоставляться со среднегодовыми ПДК, которые установлены Минздравом РФ на уровне 40 и 25 мкг/м³ соответственно.

Сравнение данных, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что в 2010 г. в Москве нормативы предельно допустимых концентраций были значительно превышены по ряду загрязняющих веществ, что могло стать причиной упомянутого выше увеличения смертности. Очевидно, что решение задачи «установления порядка» на множестве этих загрязняющих веществ, т. е. выделения тех из них, которые оказывали наиболее негативное воздействие на здоровье людей, является совершенно необходимым для разработки мероприятий по предотвращению таких негативных последствий в будущем и, следовательно, имеет важное практическое значение.

Методология такого установления порядка до настоящего времени не разработана должным образом. В ряде публикаций, например, в качестве соответствующей метрики используется «кратность превышения ПДК». Известно, однако, что по мере увеличения такой кратности степень токсичности для разных примесей возрастает с разной скоростью. Действительно, согласно публикации Перечень и коды... (2011), для такого вещества, как, например, гексахлорциклогексан, значение ПДК_{МР} составляет 0,03 мг/м³, в то время как соответствующее значение ПДК в воздухе рабочей зоны (ПДК_{РЗ}), приведенное в документе Химические факторы... (2003), равно 0,1 мг/м³. Иначе говоря, для данной примеси в условиях производства допустимо превышение ПДК_{МР} в 3,3 раза. В то же время, из аналогичных соображений следует, что, например, для диоксида серы в воздухе рабочей зоны допустимо превышение ПДК_{МР} в 20 раз, а для трифторметилбензола — более чем в 650 раз.

Для того чтобы учесть данное обстоятельство, в гигиенических нормативах различные загрязняющие вещества отнесены к разным классам опасности (заметим, что в рассмотренных выше примерах гексахлорциклогексан относится к 1-му классу опасности, диоксид серы — к 3-му, а трифторметилбензол — к 4-му). Для описания зависимости степени токсичности от кратности ПДК и класса опасности в Руководстве (1991) предложен способ определения так называемых индексов загрязнения атмосферы (ИЗА). ИЗА позволяют уловить обсуждаемые эффекты в некотором «среднем смысле», но не вполне пригодны для ранжирования конкретного набора примесей, поскольку не учитывают разброс определяющих токсичность параметров внутри одного и того же класса опасности. С учетом указанных обстоятельств в данной работе для ранжирования загрязняющих веществ по степени оказываемого ими негативного воздействия используется методология оценки риска для здоровья населения.

Исследования в области оценки риска для здоровья населения, связанных с загрязнением атмосферного воздуха различными вредными примесями, в течение ряда лет активно проводились за рубежом (в качестве примера можно упомянуть коллективную монографию Wilson, Spengler (1996)). В России исследования в на-

правления оценки риска были широко развернуты в 1990-е годы (см. публикации Авалиани (1995), Киселева и Фридмана (1997), Новикова и др. (2001), Рахманина и Онищенко (2004) и др.). В результате проведенных работ был официально утвержден нормативно-методический документ — Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04 (Рахманин и др., 2004). Изложенная в этом Руководстве методология используется далее в настоящей работе.

Для целей последующего исследования будем полагать, что риск для здоровья населения $R(c_i)$ — это характеристика вредных эффектов, способных развиться в результате воздействия факторов среды обитания человека на конкретную группу людей при специфических условиях экспозиции. По времени воздействия различаются острый и хронический риск. О канцерогенном риске говорят, если устанавливается вероятность развития канцерогенного эффекта среди экспонируемого населения на заданный срок экспозиции (один год, средняя ожидаемая продолжительность жизни и пр.). Что же касается неканцерогенного риска, то он характеризует степень превышения установленных допустимых уровней воздействия вредного фактора либо экспертно определенных безопасных уровней воздействия на основе обобщения всей доступной информации экспериментального и эпидемиологического характера. В отличие от ПДК риск является беспороговой характеристикой (обычно канцерогенного воздействия), основанной на результатах обработки массовых «натурных» обследований населения. При оценках риска хронического/острого воздействия используются однотипные шкалы (например, значения вероятности неблагоприятных последствий). В результате риск как показатель степени неблагоприятного воздействия пригоден в широком диапазоне значений концентрации ЗВ, в том числе превышающих ПДК.

С использованием данных, представленных в табл. 1, в табл. 3 приведены рассчитанные по Р 2.1.10.1920-04 значения вклада различных вредных примесей в суммарный острый и хронический риск. При этом в таблицу включены только «существенные» примеси, вклад которых превышал 5 %.

Таблица 3

**Вклад (%) вредных примесей в острый и хронический риск
Москва, 2010 г.**

Примесь	Вклад в острый риск, %	Примесь	Вклад в хронический риск, %
PM10	58,7	Формальдегид	38,2
Диоксид азота	9,4	Бенз(а)пирен	11,8
СО	8,5	PM 2.5	10,7
Озон	7,7	Озон	8,2
Аммиак	6,6	Диоксид азота	7,4
Формальдегид	6,6	PM10	6,7

Как видно из приведенных в табл. 3 оценок, основным загрязняющим веществом, ответственным за негативные острые последствия в Москве в 2010 г., является мелкодисперсный аэрозоль. Тот факт, что мелкодисперсная атмосферная пыль неблагоприятно влияет на здоровье людей, известен уже много лет (см., например, уже цитированную книгу Wilson, Spengler (1996), а также WHO, 2006). Судя по литературным данным, для сажевого аэрозоля, который содержится в дыме от пожаров, негативные эффекты могут оказаться более выраженными (WHO, 2012). Это утверждение согласуется с данными табл. 3, в которой на мелкодисперсный аэрозоль приходится более половины суммарного риска. Что же касается хронического риска, то здесь основным фактором для Москвы оказались высокие уровни загрязнения воздуха формальдегидом и бенз(а)пиреном, т. е. канцерогенами.

Представленные результаты позволяют также прийти к выводу о том, что представления о сильном негативном воздействии высоких уровней приземного озона на население Москвы являются несколько преувеличенными: как по острому, так и по хроническому воздействию в «приоритетных списках» озон оказался только на четвертом месте. Этот вывод в целом согласуется с результатами масштабного исследования влияния загрязнения воздуха на здоровье населения, выполненного в рамках проекта SAFÉ в странах Евросоюза (EEA, 2005). В этом исследовании бы-

ло установлено, что экспозиция к мелким частицам PM_{2.5} антропогенного происхождения привела в 2000 году к 348 000 преждевременным смертям в странах ЕС, причем наибольшее сокращение продолжительности жизни на наиболее загрязненных территориях за счет экспозиции к PM_{2.5} составляет до двух лет. В этом же исследовании было установлено, что увеличение ежегодной смертности вследствие экспозиции к озону составляет в этих же странах 20 000 человек, что во много раз меньше аналогичного показателя для PM_{2.5}.

В заключение можно сформулировать следующие краткие выводы.

- Основной вклад (около 60 %) в острый риск для здоровья населения в Москве в 2010 г. внес мелкодисперсный аэрозоль. Для диоксида азота, озона, аммиака и формальдегида вклад каждого в суммарный острый риск варьировал от 10 до 6,5 %.

- Основной вклад (около 40 %) в хронический (включая канцерогенный) риск для здоровья населения в Москве в 2010 г. внес формальдегид. Для бенз(а)пирена и PM_{2.5} вклад в суммарный хронический риск составлял 10—12 %, а для озона, диоксида азота и PM₁₀ — от менее 10 до 5 %.

- Планы по развитию системы инструментального мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в Москве целесообразно скорректировать таким образом, чтобы в первую очередь обеспечить контроль уровней загрязнения приоритетными примесями, определенными в настоящей работе.

- Правительству Москвы имело бы смысл разработать долгосрочную программу мероприятий, направленных на снижение уровня загрязнения воздуха по приоритетным примесям, и в первую очередь по мелкодисперсному аэрозолю, в особо неблагоприятные периоды (в том числе, при лесных пожарах), предусмотрев в ней меры коллективной и индивидуальной защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авалиани С. Л. (1995). Теоретические и методические основы гигиенической оценки реальной нагрузки воздействия химических факторов окружающей среды на организм / Автореф. дисс. ... д-ра мед. наук. — М. 42 с.

Ежегодник состояния загрязнения атмосферного воздуха на территории деятельности Центрального УГМС за 2010 год (2011). — М., ГУ «Московский ЦГМС-Р», Росгидромет. 169 с.

Еланский Н. Ф., Мохов И. И., Беликов И. Б., Березина Е. В., Елохов А. С., Иванов В. А., Панкратова Н. В., Постыляков О. В., Сафронов А. Н., Скороход А. И., Шумский Р. А. (2011). Газовый состав приземной атмосферы в Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. // Докл. РАН. Т. 437, № 1. С. 90—96.

Звягинцев А. М., Блюм О. Б., Глазкова А. А., Котельников С. Н., Кузнецова И. Н., Лапченко В. А., Лезина Е. А., Миллер Е. А., Миляев В. А., Попиков А. П., Семутникова Е. Г., Тарасова О. А., Шалыгина И. Ю. (2011). Загрязнение воздуха на европейской части России и Украине в условиях жаркого лета 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 47, № 6. С. 757—766.

Звягинцев А. М., Иванова Н. С., Блюм О. Б., Котельников С. Н., Крученицкий Г. М., Кузнецова И. Н., Лапченко В. А. (2010). Содержание озона над территорией Российской Федерации в третьем квартале 2010 г. // Метеорология и гидрология. № 11. С. 115—120.

Киселев А. В., Фридман К. Б. (1997). Оценка риска здоровью. — СПб.: Дейта. 104 с.

Кульбачевский А. О. (ред.) (2011). Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2010 году». — М., Мосэкомониторинг. 136 с.

Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух, по состоянию на 1 января 2010 г. (2011). — СПб.: Интеграл. 247 с.

Новиков С. М., Шашина Т. А., Скворцова Н. С. (2001). Критерии оценки риска при кратковременных воздействиях химических веществ // Гигиена и санитария. № 5. С. 87—89.

Рахманин Ю. А., Новиков С. М., Шашина Т. А., Иванов С. И., Авалиани С. Л., Буштуева К. А., Беляев Е. Н., Фокин М. В., Калиновская М. В., Тутельян В. А., Хотимченко С. А., Жолдакова З. И., Журков В. С., Ревазова Ю. А., Скворцова Н. С., Харчевникова Н. В., Курляндский Б. А., Хаммидуллина Х. Х., Чибураев В. И., Зайцева Н. В., Шур П. З., Кузьмин С. В., Демин В. Ф., Порфирьев Б. Н., Пожидаева Т. Я., Аксенова О. И., Киселев А. В., Фридман К. Б. (2004). Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04. — М., Минздрав РФ. 336 с.

Рахманин Ю. А., Онищенко Г. Г. (2004). Проблемы оценки риска здоровью населения от воздействия факторов окружающей среды. — М., Минздрав РФ.

Руководство по контролю загрязнения атмосферы (1991). РД 52.04.186-89. — М.: Гидрометеоздат. 693 с.

Химические факторы производственной среды. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (2003). ГН 2.2.5.1313-03. 286 с.

EEA (2005). The European environment — state and outlook 2005. — Copenhagen, EEA. 576 p.

WHO (2006). Air quality guidelines — global update 2005. — Copenhagen, WHO. 484 p.

WHO (2012). N. Janssen, M. Gerlofs-Nijland, T. Lanki, R. Salonen, F. Cassee, G. Hoek, P. Fischer, B. Brunekreef, M. Krzyzanowski. Health effects of black carbon. — Copenhagen. 92 p.

Wilson R., Spengler J. D. (1996). Particles in our air. Concentrations and health effects. — Harvard University Press. 259 p.

УДК 551.510

**ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ
ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ФОРМАЛЬДЕГИДА
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА**

Э. Ю. Безуглая, М. С. Загайнова, Т. П. Ивлева

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

Поступила в редакцию 15.02.2012
Поступила после доработки 7.03.2012

Введение

За период 2001—2010 гг. в городах России отмечен рост концентрации формальдегида в атмосфере. Даже в городах, где отсутствуют выбросы формальдегида, он отмечается в концентрациях, существенно превышающих ПДК. Средняя концентрация формальдегида с 2001 по 2008 г. возросла на 12 %, а в 2010 г. по сравнению с 2009 г. увеличилась еще на 30 %. Такой рост не может быть объяснен выбросами формальдегида, которые невелики и в целом по России составили в 2009 г. 1660 т (Ежегодник, 2009).

Формирование высоких концентраций формальдегида в атмосфере происходит при наличии метана и других углеводородов в цепи последовательных реакций с участием оксидов азота, оксида углерода, озона и других веществ (Безуглая и др., 2010). Ранее в работе Безуглой и др. (2008а) было показано, что в условиях глобального потепления изменяются скорости химических реакций в атмосфере и соответственно повышается химическая активность атмосферного воздуха. По данным ежедневных наблюдений в Белоярском, Ханты-Мансийске и Радужном была

установлена зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха. Коэффициент корреляции составил 0,6—0,76.

Данные наблюдений, выполненных летом 2010 г., когда на большей части европейской территории России установилась аномально жаркая погода, позволили проанализировать влияние температуры воздуха на формирование уровня загрязнения формальдегидом на большом эмпирическом материале и ответить на вопрос о возможности оценки средних за месяц концентраций этой примеси в летнее время при повышении температуры.

Зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха

В данной работе использованы результаты наблюдений в 19 городах европейской территории России, расположенных в разных климатических зонах, за летние месяцы (июнь—август) в период 2001—2010 гг. Как известно, концентрация формальдегида в воздухе имеет четко выраженный годовой ход: она всегда минимальна зимой и заметно увеличивается летом (рис. 1).

Анализ данных наблюдений в 19 городах показал, что связь концентрации формальдегида с температурой для большинства городов европейской территории России довольно тесная, коэффициент корреляции колеблется преимущественно в пределах 0,51—0,85 и только в отдельных городах (Балакове, Нижнем Новгороде, Перми, Сыктывкаре, Туле и Ульяновске) меньше 0,5 (табл. 1).

Примеры типичных зависимостей концентраций формальдегида от температуры воздуха, полученные по данным наблюдения в городах Тольятти и Санкт-Петербург, приведены на рис. 2.

Далее связь между температурой воздуха и концентрацией формальдегида была определена для пяти групп городов. Объединение городов в группы производилось с учетом средней концентрации примеси летом и географического положения города (рис. 3—7).

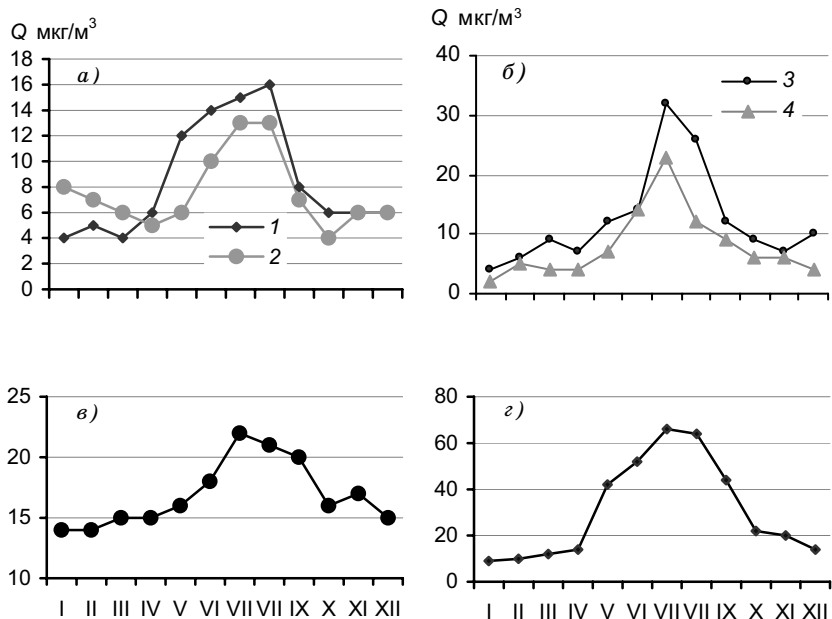


Рис. 1. Годовой ход концентрации формальдегида в городах.
a — Казань (1) и Тольятти (2), *б* — Дзержинск (3) и Сыктывкар (4), *в* — Ставрополь,
г — Ясная Поляна.

Результаты анализа связи между концентрацией формальдегида и температурой воздуха представлены в табл. 2. Для рассмотренных пяти групп городов коэффициент корреляции между концентрацией формальдегида и температурой составляет 0,54—0,68. При повышении температуры воздуха от 15 до 20 °С концентрация формальдегида изменяется в основном в пределах от 2,6 до 5,4 мкг/м^3 , однако в первой группе северных городов это изменение достигает 9,6 мкг/м^3 . При повышении температуры воздуха от 20 до 25 °С концентрация формальдегида увеличивается на 2,6—10,7 мкг/м^3 . Изменения концентрации формальдегида при повышении температуры от 25 до 30 °С удалось оценить только для одной группы городов.

Таблица 1
**Коэффициент корреляции (*R*) между
 концентрацией формальдегида и
 температурой воздуха**

Город	<i>R</i>
Балаково	0,49
Волгоград	0,55
Дзержинск	0,85
Казань	0,59
Киров	0,65
Курск	0,55
Набережные Челны	0,51
Нижний Новгород	0,43
Новочебоксарск	0,53
Оренбург	0,53
Пермь	0,39
Санкт-Петербург	0,57
Ставрополь	0,74
Сыктывкар	0,38
Тольятти	0,67
Тула	0,38
Ульяновск	0,44
Череповец	0,56
Ясная Поляна	0,83

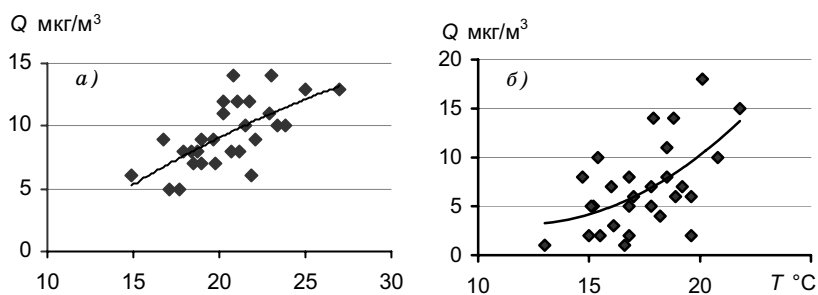


Рис. 2. Зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха в городах Тольятти (а) и Санкт-Петербурге (б).

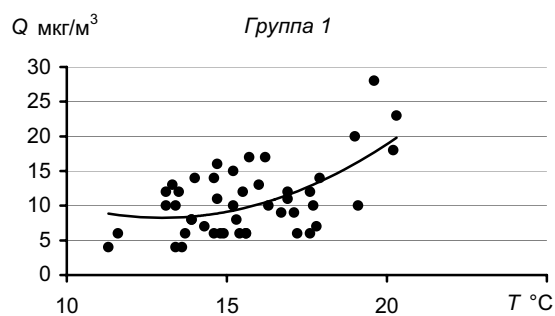


Рис. 3. Зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха в Санкт-Петербурге, Сыктывкаре и Череповце.

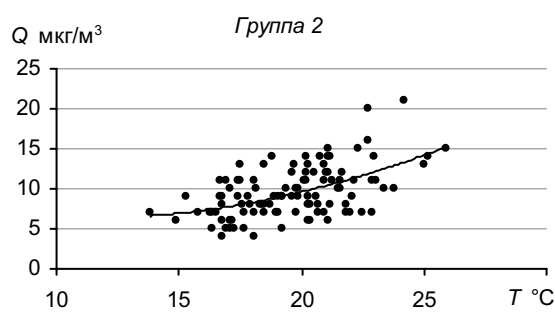


Рис. 4. Зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха в Казани, Тольятти и Ульяновске.

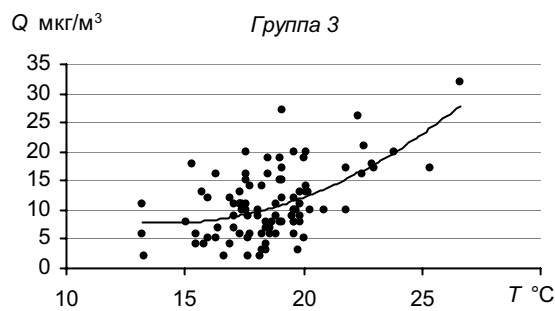


Рис. 5. Зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха в Курске, Дзержинске, Туле и Ясной Поляне.

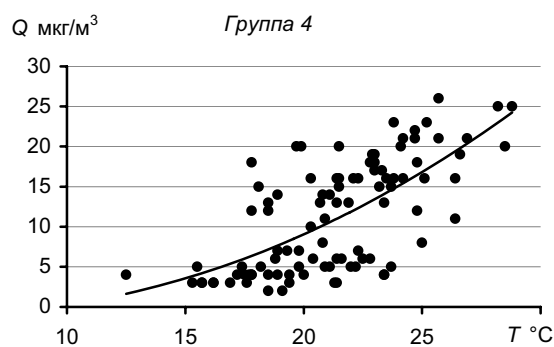


Рис. 6. Зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха в Волгограде, Нижнем Новгороде, Оренбурге и Ставрополе.

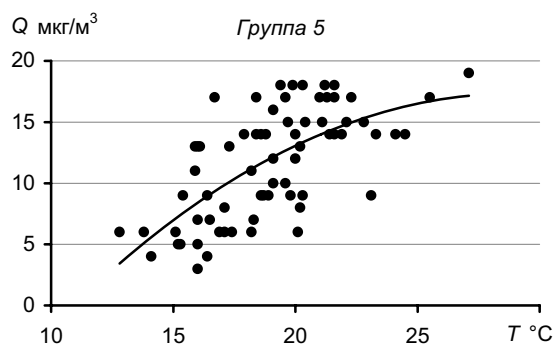


Рис. 7. Зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха в Балакове, Новочебоксарске и Кирове.

Различия в степени роста концентрации формальдегида существенно зависят от уровня загрязнения воздуха этой примесью. Зависимость увеличения концентрации формальдегида при повышении температуры воздуха на каждые 5 °C (по градациям табл. 2) от средней летней концентрации примеси представлена на рис. 8. Для рассматриваемых городов коэффициент корреляции данной связи составил 0,68. Получено, что при изменении температуры

Таблица 2

Коэффициент корреляции (R), уравнения связи между концентрацией формальдегида и температурой воздуха, а также значения увеличения концентрации формальдегида (ΔQ) при повышении температуры воздуха на 5°C (от 15 до 20°C (ΔQ_1), от 20 до 25°C (ΔQ_2) и от 25 до 30°C (ΔQ_3))

Группа городов	R	Уравнение	ΔQ мкг/м ³		
			ΔQ_1	ΔQ_2	ΔQ_3
Группа 1	0,59	$Q = 0,215T^2 - 5,602T + 44,62$	9,6	—	—
Группа 2	0,54	$Q = 0,038T^2 - 0,811T + 10,47$	2,6	4,5	—
Группа 3	0,56	$Q = 0,129T^2 - 3,675T + 33,77$	4,2	10,7	—
Группа 4	0,68	$Q = 0,045T^2 - 0,495T + 0,728$	5,4	7,7	9,9
Группа 5	0,66	$Q = -0,053T^2 + 3,085T - 27,32$	4,5	2,6	—

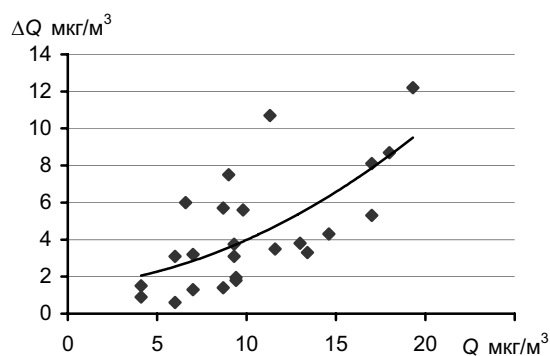


Рис. 8. Зависимость увеличения концентрации формальдегида (ΔQ) при повышении средней температуры на каждые 5°C (15 — 30°C) от его средней летней концентрации в городе.

воздуха на 5°C концентрация формальдегида будет возрастать на 2 — 4 мкг/м³ при уровне загрязнения менее 10 мкг/м³, и на 6 — 10 мкг/м³ при концентрации более 15 мкг/м³.

Изменение коэффициента трансформации

Наблюдаемое в последние годы усиление химической активности атмосферы (Безуглая и др., 2008б) проявляется в увеличении значений коэффициентов трансформации (КТ) оксида азота в диоксид азота. Для 19 рассматриваемых городов за 10 лет (1997—2006 гг.) обнаружен рост КТ на 11—66 %. Ростом КТ можно объяснить и изменение средних за год значений концентрации формальдегида, отмеченное в работе Безуглой и др. (2010). Несмотря на то что в период 1997—2007 гг. в 66 городах наблюдался рост концентраций формальдегида в среднем на 84 %, а в 43 городах было зафиксировано снижение концентрации формальдегида в среднем на 38 %, в целом можно говорить о преобладании тенденций повышения концентраций формальдегида.

Данные об изменении КТ за период 1997—2010 гг. для 15 городов, представленные в табл. 3, свидетельствуют о сохранении химической активности атмосферы, поскольку увеличение КТ для отдельных городов колеблется от 10 до 64 %. Наибольшее увеличение КТ (превышающее 50 %) отмечено в Ханты-Мансийске, Хабаровске, Калуге и Челябинске. В каждом городе для расчета КТ использовалось до 168 среднемесячных значений концентраций оксида и диоксида азота.

Изменения КТ за последние 14 лет для отдельных городов представлены на рис. 9—11.

Таблица 3

Изменение КТ за период 1997—2010 гг.

Город	Δ КТ %	Город	Δ КТ %
Барнаул	35	Хабаровск	53
Великий Новгород	-30	Ханты-Мансийск	55
Калуга	56	Челябинск	64
Нерюнгри	40	Череповец	10
Новокузнецк	25	Чита	33
Санкт-Петербург	10	Электросталь	15
Серпухов	40	Южно-Сахалинск	36
Старый Оскол	46		

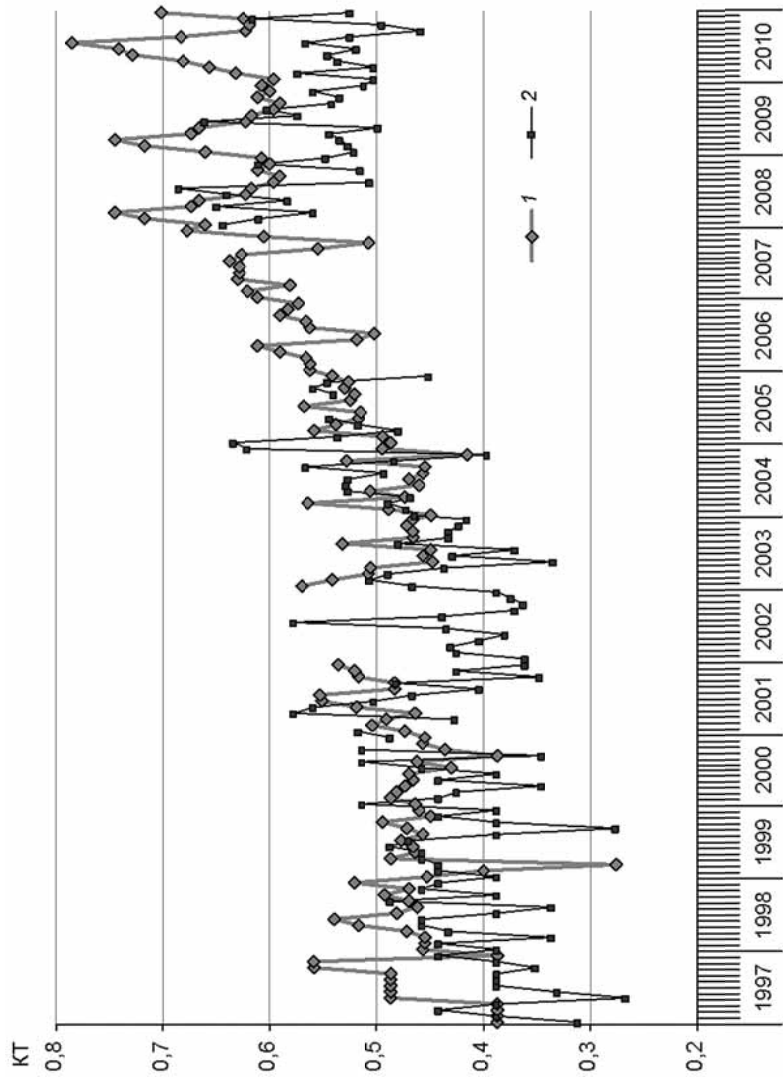


Рис. 9. Изменение КТ за период 1997—2010 гг. в Калуге (1) и Серпухове (2).

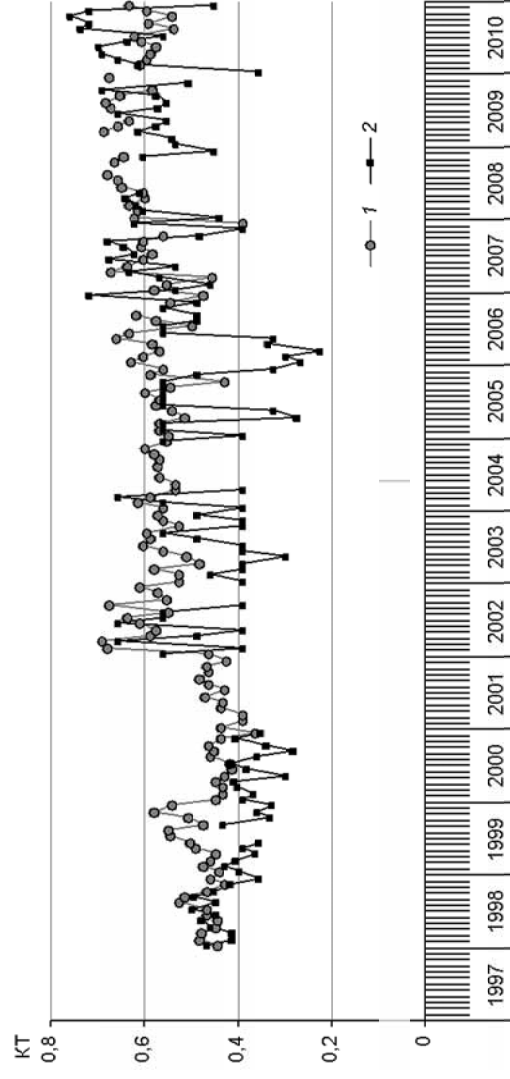


Рис. 10. Изменение КТ за период 1997—2010 гг. в Старом Осколе (1) и Челябинске (2).

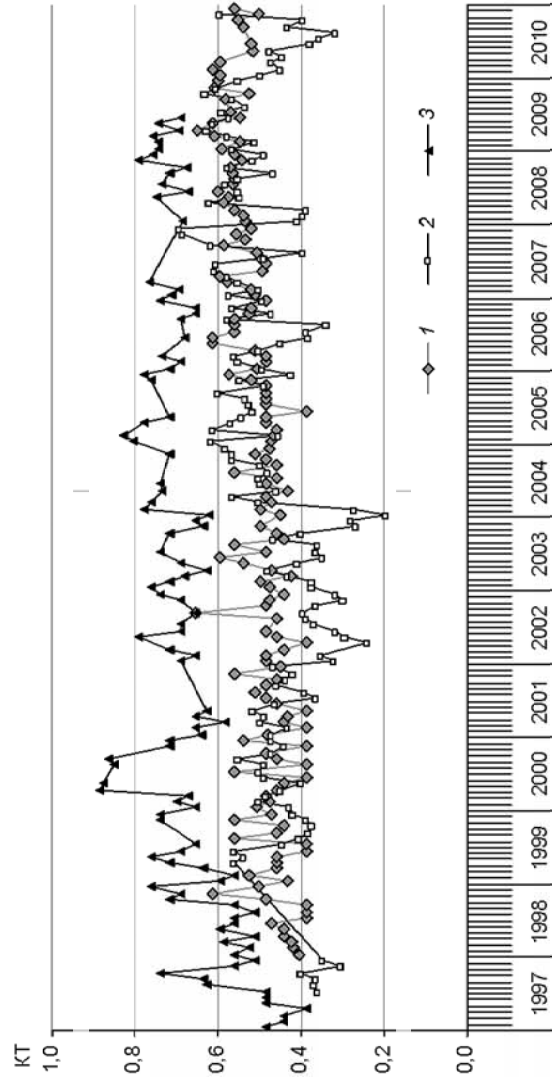


Рис. 11. Изменение КТ за период 1997—2010 гг. в Чите (1), Южно-Сахалинске (2) и Барнауле (3).

Несмотря на то что средние месячные значения КТ варьируют в широких пределах (см. рис. 9—11), за десятилетие (2001—2010 гг.) увеличение КТ составило от 0,1 до 0,2.

По данным наблюдений за концентрацией оксида и диоксида азота за десятилетний период (2001—2010 гг.) в 14 городах РФ не удалось обнаружить четкой связи КТ со среднемесячной температурой воздуха (рис. 12).

В то же время, рост концентраций формальдегида (ΔQ) при увеличении КТ ($\Delta КТ$) проявляется четко. Представленная на рис. 13 зависимость ΔQ от $\Delta КТ$ получена по данным наблюдений за период 1997—2010 гг. в городах Барнауле, Калуге, Новокузнецке, Санкт-Петербурге, Серпухове, Старом Осколе, Челябинске, Череповце, Чите и Хабаровске, где проводились одновременные измерения концентрации формальдегида, оксида и диоксида азота.

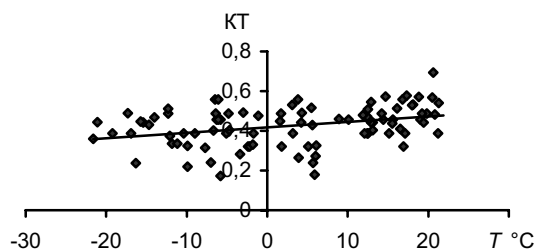


Рис. 12. Изменения КТ в Челябинске в зависимости от температуры воздуха.

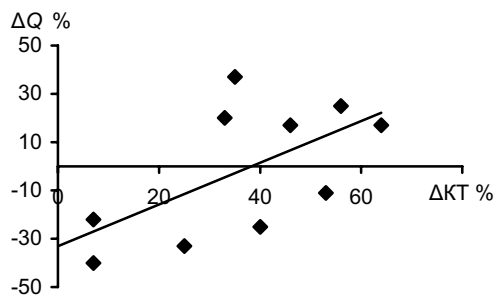


Рис. 13. Связь изменений концентрации формальдегида (ΔQ) и КТ ($\Delta КТ$) по данным наблюдений за период 1997—2010 гг.

Заключение

В результате анализа информации о концентрации формальдегида и температуре воздуха за последние годы можно сделать ряд важных выводов.

1. В летние месяцы обнаружена четкая связь между повышением температуры воздуха и ростом концентрации формальдегида. При повышении температуры воздуха на 5 °С рост концентрации формальдегида составляет 2—4 мкг/м³ при концентрации примеси менее 10 мкг/м³ и 6—10 мкг/м³ при концентрации более 15 мкг/м³. Такая связь может служить основой для оценки концентрации формальдегида в теплый период года.

2. Наличие тесной связи между температурой воздуха и концентрацией формальдегида указывает на природное образование формальдегида в результате фотохимических реакций, происходящих в загрязненной атмосфере городов. Нет необходимости изыскивать источники выбросов формальдегида, их может быть очень мало. Для уменьшения уровня загрязнения воздуха этим веществом необходимо общее снижение промышленных выбросов.

3. Использование данных наблюдений за концентрациями оксида и диоксида азота в 15 городах за 1997—2010 гг. подтвердило полученный ранее вывод об увеличении КТ.

4. Для разработки метода прогноза концентрации формальдегида в зависимости от изменения температуры воздуха требуется дальнейшая проверка полученных выводов на независимом материале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безуглая Э. Ю., Воробьева И. А., Ивлева Т. П. (2008). Химическая активность атмосферы на территории России // Труды ГГО. Вып. 559. С. 121—133.

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., Полуэктова М. В. (2010). Исследование химических процессов в атмосфере по данным мониторинга в городах // Труды ГГО. Вып. 561. С. 164—184.

Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2009 год (2010) / Под ред. В. Б. Миляева. — СПб, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха Санкт-Петербурга». 560 с.

Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2010 г. (2011). — СПб. 224 с.

УДК 551.510.42

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОСТИ
ВЫБРОСОВ ИСТОЧНИКОВ
С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН**

А. Д. Зив

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

Поступила в редакцию 7.03.2012
Поступила после доработки 23.04.2012

1. Введение и постановка задачи

Как известно, функционирование источников выбросов, даже относящихся к одному и тому же предприятию, может быть существенно асинхронным, неодновременным. При расчетах максимальных разовых концентраций (МРК) рекомендуется предварительно проводить анализ возможных комбинаций совпадений моментов выбросов с целью определения наиболее неблагоприятной ситуации (Берлянд и др., 1987). Если просто рассматривать все максимальные значения выбросов, как будто все источники работают в этом режиме одновременно, мы можем получать завышенные значения концентраций.

В работе Берлянда и др. (1987) рекомендуется характеризовать нестационарность выбросов конкретного источника соотношением среднегодовых и максимальных выбросов. Обе эти величины присутствуют в стандартной инвентаризации выбросов. В настоящей работе будет рассмотрен возможный подход к учету нестационарности каждого источника и соответственно асинхронности выбросов совокупности источников, основанный на чисто вероятностной интерпретации упомянутого отношения. Будем считать, что в любой момент времени источник имеет максимальный выброс с вероятностью

$$p = M_{\text{сг}}/M_{\text{мр}},$$

где $M_{\text{ср}}$ — среднегодовой выброс (г/с), $M_{\text{мр}}$ — максимальный разовый выброс (г/с). Нулевой выброс имеет вероятность $q = 1 - p$. Таким образом, выброс каждого источника рассматривается как дискретная случайная величина M , принимающая два значения: 0 с вероятностью $1 - p$ и $M_{\text{мр}}$ с вероятностью p .

В любой расчетной точке концентрация, обусловленная действием конкретного источника при заданных внешних параметрах, может рассматриваться как произведение неслучайной величины — функции источника f — на случайную величину M . Понятно, что полученная таким образом случайная величина $\xi = fM$ принимает также два значения: 0 с вероятностью $1 - p$ и $c = fM_{\text{мр}}$ с вероятностью p . Если концентрация в рассматриваемой точке обусловлена действием N источников, то в предположении независимости режима работы каждого из источников от других источников, эта концентрация может рассматриваться как случайная величина Ξ , являющаяся суммой независимых дискретных случайных величин ξ_n :

$$\Xi = \sum_{n=1}^N \xi_n. \quad (1)$$

При этом каждая случайная величина ξ_n характеризуется плотностью вероятности

$$P\{\xi_n = c_n\} = p_n, \quad P\{\xi_n = 0\} = 1 - p_n \equiv q_n. \quad (2)$$

Обозначим через Λ совокупность векторов $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)'$ (штрих означает транспонирование) из нулей и единиц длиной N . Если номера источников выбросов фиксированы, каждым таким вектором можно описать ситуацию, когда «работают» только те источники, номерам которых соответствуют единицы в λ . Пусть вероятность такой ситуации есть ω_λ , а соответствующая концентрация C_λ . Тогда дискретная плотность распределения величины Ξ характеризуется соотношениями

$$P\left\{C_\lambda = \sum_{n=1}^N \lambda_n c_n\right\} = \prod_{n=1}^N p_n^{\lambda_n} q_n^{1-\lambda_n} \equiv \omega_\lambda. \quad (3)$$

Пусть J — число значений, которые принимает Ξ . При этом $J \leq 2^N$, поскольку, вообще говоря, некоторые значения C_λ могут совпадать (вероятности при этом суммируются). Введем сквозную нумерацию пар (C_j, ω_j) : $j = 1, 2, \dots, J$, и упорядочим пары в соответствии с возрастанием C_j . Тогда

$$\left\{ F_j = \sum_{\tau=1}^j \omega_\tau \right\}_{j=1, 2, \dots, J} \quad (4)$$

есть функция вероятности Ξ . При расчетах максимальных разовых концентраций надо по этой функции распределения определить с некоторым приближением 98-й перцентиль (перцентиль, 0,98 квантиль), т. е. такое значение C_{98} , при котором вероятность того, что $\Xi \leq C_{98}$, равна 0,98. Заметим здесь, что в случае дискретного распределения 98-й перцентиль определяется с некоторой погрешностью, которая зависит от вида распределения. Довольно очевидно также, что по возможности определение 98-го перцентилля должно происходить достаточно быстро, поскольку сам по себе расчет МРК состоит в переборе «внешних параметров» и для каждой расчетной точки объем такого перебора может доходить до нескольких тысяч (см. п. 4).

2. Несколько способов оценки 98-го перцентилля распределения (4)

Простейшим методом решения этой задачи является «прямой» метод, т. е. явное вычисление всех значений (C_j, ω_j) или, что почти то же самое, значений (C_j, F_j) . Однако экспоненциальный рост числа операций с увеличением N , $O(2^N)$, делает возможным применение «прямого» метода только для очень небольших N даже при

использовании различных методов ускорения вычислений (Evans, Leemis, 2004; Ахо и др., 1979) сумм в формуле (3).

Еще одна возможность решения задачи — использование аппарата производящих функций. Поскольку производящая функция G_{Ξ} для Ξ есть произведение производящих функций для ξ_n , постольку

$$G_{\Xi}(s) = \prod_{n=1}^N (q_n + p_n e^{c_n s}).$$

Однако в общем случае раскрытие произведения в этой формуле также фактически приводит к тем же объемам вычислений, что и «прямой» метод.

В связи с быстрым ростом объема вычислений при использовании прямых методов рассматриваются различные способы аппроксимации функции распределения F (Evans, Leemis, 2004; Daniels, 1954). Простейшим является аппроксимация нормальным распределением, поскольку, как известно, распределение суммы независимых случайных величин сходится к нормальному распределению. Понятно, однако, что при небольшом числе слагаемых аппроксимация может быть не слишком хорошей.

Как показали численные эксперименты (см. ниже), определенное улучшение результатов дает корректировка значения дисперсии D^2 приближающего нормального распределения по вычисленному эксцессу. А именно, дисперсия вычисляется «заново» (корректируется) по предварительно вычисленному значению коэффициента эксцесса с учетом того, что в случае нормального распределения этот коэффициент равен нулю. Полагаем, таким образом, что $D_{\text{кор}}^4 = \mu_4/3$, где μ_4 — четвертый центральный момент распределения Ξ . Заметим при этом, что среднее E , «исходная» дисперсия D^2 и моменты до 4-го порядка распределения Ξ находятся обычным способом по значениям (p_n, c_n) . Далее 98-й процентиль распределения Ξ вычисляется так же, как процентиль непрерывного нормального распределением со средним E и дисперсией D^2 (исходной) или $D_{\text{кор}}^2$ (откорректированной). Такой

метод оценки является, очевидно, самым быстрым, но, как показывают численные эксперименты, не очень точным.

Еще один возможный способ аппроксимации функции распределения Ξ состоит в применении гистограммы (строго говоря, нормализованной гистограммы). Предположим сначала, что все значения c_n в формуле (2) — натуральные числа. Тогда носитель Ξ находится внутри отрезка $[0, T]$, где $T = \sum_{n=1}^N c_n$. Более того, Ξ

однозначно представляется массивом вероятностей (гистограммой) $\Sigma = \{\sigma_t\}_{t=0, \dots, T}$, сумма элементов которого равна 1 и $\sigma_t > 0$, если Ξ принимает значение t с вероятностью σ_t .

Вычисляя сумму (1), будем последовательно заполнять Σ , обнулив его вначале. Для $n = 1$ положим $\sigma_0 = 1 - p_1$, $\sigma_u = p_1$, где $u = c_1$. Пусть Σ заполнен для некоторого $n - 1$, т. е. вычислена частичная сумма $n - 1$ слагаемых в формуле (1), которая, очевидно, является случайной величиной и уже имеет тем самым представление массивом Σ . Тогда n -й шаг состоит в сложении уже полученной случайной величины с ξ_n , имеющей распределение (2). При сложении дискретных случайных величин каждое значение первого слагаемого складывается с каждым значением второго слагаемого, соответствующие вероятности при этом перемножаются. Затем все значения ранжируются, и вероятности при повторяющихся значениях складываются.

В соответствии с этим алгоритмом n -й шаг осуществим следующим образом:

а) для всех t положим $\sigma'_t = \sigma_t(1 - p_n)$, прибавляя тем самым нулевое значение ξ_n ;

б) для всех $t \leq T - u$ положим $\sigma''_{t+u} = \sigma_t p_n$, где $u = c_n$, прибавляя ненулевое значение случайной величины ξ_n , равное c_n ; для $t > u$ положим $\sigma''_t = 0$;

в) для всех t положим $\sigma_t = \sigma'_t + \sigma''_t$, завершая тем самым процесс суммирования на n -м шаге.

Таким образом, правило суммирования соблюдено с той лишь разницей, что на каждом шаге порядок следования значений случайной величины не меняется и заключительное ранжирование не требуется. Первое условие на t введено из формальных соображений: по определению T сумма $t + u$ никогда не может быть больше T . Нулевые значения в Σ , умноженные на ненулевые в п. a и b (см. выше), останутся нулевыми, и суммирование в п. b корректно.

Понятно, что приведенный способ вычисления распределения Ξ требует не более чем $2TN$ операций, и это очень грубая оценка. Трудоемкость «прямого» метода, как уже отмечалось выше, есть $O(2^N)$.

Вернемся к реальным числам. Преобразуем их к натуральным с тем, чтобы использовать изложенный выше метод. С этой целью зададимся некоторым целым $K > 0$, сопоставим каждому c_n целое число

$$k_n = \left[\frac{c_n}{d} \right], \quad d = \frac{\sum_{n=1}^N c_n}{K}, \quad (5)$$

где квадратные скобки обозначают целую часть числа, и вычислим сумму уже целочисленных случайных величин. Таким образом, дискретное распределение Ξ аппроксимируется гистограммой, или, иными словами, тоже дискретным распределением, но с заданным и меньшим числом значений. Более того, Ξ сопоставляется целочисленная случайная величина, что позволяет использовать вышеприведенный метод суммирования. Точность аппроксимации зависит от величины K , но от этой же величины зависит объем вычислений. Вычисление 98-го перцентиля при этом осуществляется так же, как для любого дискретного распределения.

3. Численные эксперименты

С целью исследования всех трех способов аппроксимации была проведена серия численных экспериментов, в которой случайным образом генерировалось 10 000 наборов по N значений пар

(p_n, c_n) для случаев $N = 10$ и $N = 20$ (10 и 20 источников). Использовались прямой метод вычисления 98-го перцентиля Ξ и четыре способа его вычисления с помощью аппроксимации распределения Ξ нормальным распределением, нормальным распределением с корректировкой дисперсии, гистограммой с $K = 100$, гистограммой с $K = 1000$. Значения p_n выбирались из интервала $(0, 1)$, поскольку это вероятности значения c_n из интервала $(0, 10)$. Заметим, что верхняя граница второго интервала, вообще говоря, несущественна. Данные вычисления, по-видимому, можно назвать статистической оценкой качества используемых методов.

Для каждого случая аппроксимации была построена функция распределения центрированной относительной погрешности δ (%):

$$\delta = 200 \frac{|p98 - p98_{appr}|}{p98 + p98_{appr}},$$

где $p98$ — значение 98-го перцентиля, определенное прямым методом, а $p98_{appr}$ — полученное с помощью соответствующей аппроксимации.

В табл. 1 для наглядности даны лишь некоторые значения квантилей погрешности для случаев 10 и 20 источников. В последней строке таблицы приводится суммарное (10 000 случайных выборок) время вычислений для каждого варианта. Для сравнения в предпоследней строке дано время вычисления для прямого метода.

Из таблицы видно, что метод аппроксимации гистограммой дает существенно лучшие результаты, чем аппроксимация нормальным распределением. В свою очередь, коррекция дисперсии аппроксимирующего нормального распределения также позволяет значительно улучшить результаты: высокие квантили ошибки оказываются почти в два раза меньше. Что касается времени счета, видно, что при небольшом числе источников и прямой перебор может считаться приемлемым, но увеличение числа слагаемых в сумме (2) до 20 делает его применение невозможным.

Таблица 1

Значения квантилей погрешности δ

Квантиль	\aleph	$\aleph_{\text{кор}}$	$K=100$	$K=1000$	\aleph	$\aleph_{\text{кор}}$	$K=100$	$K=1000$
	<i>10 источников</i>				<i>20 источников</i>			
0,1	0,79	0,94	0,13	0,01	0,72	0,92	1,30	0,02
0,2	1,64	1,81	0,27	0,02	1,37	1,69	1,80	0,03
0,3	2,55	2,68	0,41	0,04	2,23	2,54	2,22	0,05
0,4	3,54	3,57	0,56	0,05	3,10	3,27	2,60	0,07
0,5	4,60	4,54	0,72	0,07	4,08	4,19	2,92	0,09
0,6	5,81	5,63	0,91	0,08	5,22	5,17	3,27	0,11
0,7	7,45	6,85	1,12	0,10	7,02	6,38	3,65	0,13
0,8	9,96	8,40	1,39	0,12	9,10	7,95	4,12	0,16
0,9	14,61	10,83	1,78	0,16	13,44	10,04	4,78	0,21
0,95	19,28	13,06	2,16	0,19	17,58	12,00	5,36	0,24
0,98	24,60	15,57	2,57	0,23	23,64	14,88	6,01	0,30
0,99	29,18	17,40	2,91	0,26	30,04	16,25	6,26	0,34
Время CPU, с	Прямой метод 3,7				Прямой метод 4438,5			
Время CPU, с	0,34	0,35	1,07	1,41	0,36	0,38	1,21	3,7

Примечание. \aleph — нормальное распределение, $\aleph_{\text{кор}}$ — нормальное распределение с скорректированной дисперсией; $K = 100$ и $K = 1000$ — аппроксимация гистограммой при $K = 100$ и $K = 1000$.

Метод гистограммы при той точности, которую он показывает, делает его применение, на наш взгляд, достаточно обоснованным. У авторов не было возможности оценить его точность при большем числе слагаемых в силу ограниченности компьютерных ресурсов, но время счета только для этого метода представлено в табл. 2. Нелинейная зависимость от N обусловлена, по-видимому, степенью наполненности гистограммы.

Следует обратить внимание на увеличение погрешности при использовании метода гистограммы с увеличением числа слагаемых N . При этом в случае $K = 100$ погрешность возрастает существенно больше, чем при $K = 1000$. Это обусловлено, по-видимому, двумя причинами: во-первых, погрешностью при преобразовании

Таблица 2

**Зависимость времени счета для метода
гистограммы от числа слагаемых N
и числа интервалов K в гистограмме**

K	Число слагаемых				
	10	20	50	100	200
100	1,1	1,2	1,8	2,4	4,5
1000	1,4	3,7	11,1	15,1	21,1

вещественного числа в целое и, во-вторых, точностью вычисления 98-го перцентиля распределения. Можно предположить, что первая погрешность будет возрастать, как квадратный корень из N , тогда как вторая останется постоянной.

Представляет также интерес оценка эффекта учета асинхронности. Если асинхронность не учитывается, концентрация равна максимально возможному значению, т. е. максимальному значению суммы случайных величин Ξ и Ξ_{\max} . Если асинхронность учитывается, концентрация равна 98-му перцентилю Ξ , Ξ_{98} . Эффект учета асинхронности можно, таким образом, характеризовать отношением $R = \Xi_{\max}/\Xi_{98}$.

В табл. 3 даны некоторые квантили распределения отношения $R = \Xi_{\max}/\Xi_{98}$. Распределение получено опять-таки из случайной выборки (10 000 вариантов) 20 случайных значений (p_n, c_n). В реальной ситуации расчета концентраций отношение R , очевидно, может сильно варьировать, так что представленные в таблице значения весьма «ориентировочные». Отметим также, что если все p_n и c_n одинаковы, мы имеем биномиальное распределе-

Таблица 3

**Квантили отношения R максимально возможной концентрации
к концентрации, вычисленной с учетом асинхронности
($K = 1000$, случайный выбор)**

Квантиль.....	0,10	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
R	1,23	1,39	1,43	1,47	1,52	1,61	1,69	1,79	1,82

ние и R может быть легко вычислено. Значение R будет зависеть при этом от числа переменных (в меньшей степени) и значения p_n . Так, при $N = 20$ и $p_n = 0,5$ $R \cong 1,5$, при $p_n = 0,2$ $R \cong 2,9$, при $N = 50$ и $p_n = 0,5$ $R \cong 1,6$.

4. О практической реализации

Как уже отмечалось выше, методология расчета максимальных разовых концентраций состоит в переборе для каждой расчетной точки определенного числа комбинаций скорость—направление ветра и выбора максимальной концентрации из всех, вычисленных для каждой такой пары. Не затрагивая здесь вопрос об оптимизации поиска этого максимума, предположим просто, что осуществляются все вычисления, т. е. опять-таки используется «прямой» метод. Если предположить, что перебираются направления ветра через 1° (всего 360°) и 100 значений скорости ветра, то оказывается, что нужно осуществить 36 000 вычислений, добавив к каждому из них тот или иной метод суммирования из рассмотренных в предыдущем разделе. С учетом того, что время, приведенное в табл. 1, относится к 10 000 повторений, на каждую расчетную точку требуется дополнительно в три раза больше времени, указанного в последней строке таблицы, что представляется вполне приемлемым.

Рационализация всей методологии вычислений с учетом предлагаемых алгоритмов учета нестационарности может быть предметом отдельного исследования.

Заметим также, что принятая модель учета нестационарности и асинхронности, конечно же, достаточно абстрактна. Для конкретного производства дискретность функционирования оборудования может быть не столь простой, как «работает — не работает». Однако и метод аппроксимации нормальным распределением, и метод гистограммы могут быть легко изменены для большего числа дискретных состояний; более того, число этих состояний может быть разным для разных источников. В обоих случаях время счета будет возрастать не более, чем линейно.

5. Заключение

Предложенная здесь модель описания асинхронности выбросов достаточно абстрактна и рассчитана, в первую очередь, на большое число источников, связь режимов функционирования которых установить достаточно сложно. Если же при этом для каких-то групп источников такие связи могут быть описаны, то каждая из таких групп источников уже не может рассматриваться как набор независимых случайных величин внутри группы. Однако при этом для остальных источников обусловленные этой группой концентрации могут рассматриваться как независимые величины. Такую конструкцию предполагается рассмотреть в дальнейшем.

В настоящей работе сознательно не обсуждались вопросы практической реализации методологии, поскольку способ ее использования сильно зависит от конкретной задачи и тех алгоритмов, которые используются при «обычном» расчете (без учета асинхронности выбросов). Однако полученные результаты по точности и скорости счета, на наш взгляд, свидетельствуют о возможности практического использования изложенной здесь методологии (см. п. 4).

Заметим также, что приводимый здесь метод аппроксимации распределения суммы случайных величин в виде гистограммы, скорее всего, не является оригинальным, хотя прямой ссылки найти не удалось. Что-то подобное, вероятно, было сделано в работе Bruno, Tomassetti (2006). В любом случае, метод слишком очевиден, чтобы никто им до сих пор не воспользовался.

Данная работа была отчасти обусловлена обсуждением темы нестационарности выбросов с Е. Л. Гениховичем, за что автор ему очень благодарен. Автор также выражает свою признательность Р. И. Оникулу и О. В. Двиняниной за очень полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж. (1979). Построение и анализ вычислительных алгоритмов. — М.: Мир, с. 542.

Берлянд М. Е., Буренин Н. С., Оникул Р. И. и др. (1987). Рекомендации по учету нестационарности технологических процессов и режимов работы различ-

ных производств при составлении отраслевых методик по расчету выбросов в атмосферу и их нормативов. — Л., ГГО. 90 с.

Bruno M. G., Tomassetti A. A. (2006). On the calculation of convolution in actuarial applications: a case study using discrete random variables / In: Proc. 10th WSEAS Intern. Conf. on Applied Mathematics, 999-6666-22-1 Dallas, Texas, p. 538—546.

Daniels H. E. (1954). Saddlepoint approximations in statistics // Ann. Math. Statist. V. 25, No. 4 (1954). P. 631—650.

Evans D. L., Leemis L. M. (2004). Algorithms for computing the distributions of sums of discrete random variables // Mathematical and Computer Modelling 0 (2004) 1. P. 1—24.

УДК 551.576

**КЛИМАТОЛОГИЯ ОБЛАЧНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
МЕЖДУНАРОДНОГО СПУТНИКОВОГО ПРОЕКТА**

О. М. Покровский

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

Поступила в редакцию 17.02.2012

Облачность является одним из ключевых метеорологических элементов. Определяя приход солнечной радиации и регулируя уходящее тепловое излучение, облачность оказывает определяющее влияние на энергетический баланс Земли. Посредством выпадения из облаков осадков, запускается глобальный круговорот воды. Тем не менее до сих пор физика образования и эволюции облаков остается недостаточно изученной областью знаний.

Наблюдения за облаками на метеостанциях имеют ряд серьезных недостатков. Прежде всего, оценка количества облаков осуществляется наблюдателем субъективно. Кроме того, поскольку масштаб горизонтальной изменчивости облачности колеблется от нескольких километров до нескольких десятков километров, эффективное покрытие территории земного шара с помощью наземной метеорологической сети составляет сотые доли одного процента.

Появление метеорологических спутников принципиально изменило положение в части сбора информации о пространственно-временном распределении облачности в глобальном масштабе. Особенно важным оказалось постоянное функционирование геостационарных спутников «Метеосат», которые обеспечили непрерывное слежение за каждым фрагментом облачного покрова с высоким разрешением.

В 1982 г. в США стартовал Международный спутниковый проект облачной климатологии (International Satellite Cloud

Climatology Project, ISCCP) (Schiffer and Rossow, 1983). Этот проект был запущен как часть климатической программы ВМО — World Climate Research Programme (WCRP). Цель проекта состояла в сборе и анализе данных радиационных спутниковых измерений для контроля глобального распределения облачности, получения сведений о физических свойствах облаков, их суточной, сезонной и межгодовой изменчивости. Сбор и анализ данных был начат 1 июля 1983 г. и продолжается до сих пор.

К настоящему времени ISCCP сформировал ряд взаимодействующих компьютерных и научных экспериментальных центров. Центр первичной обработки данных (Satellite Processing Center, SPC) направляет свои результаты в Центр глобальной обработки (Global Processing Center, GPC), где данные интегрируются в соответствии с пространственной и временной зависимостью. На следующем этапе происходит географическая привязка данных в Центре согласования данных (Correlative Data Center, CDC). Далее данные подвергаются калибровке и верификации в Центре привязки спутниковых данных (Satellite Calibration Center, SCC). На заключительном этапе данные архивируются в Централизованном архиве международного проекта по климатологическому обобщению спутниковых данных об облаках (ISCCP Central Archive, ICA) и в Исследовательском центре Лэнгли (NASA Langley Research Center, LARC).

В настоящее время данные наблюдений размещены на Интернет-сайтах ISCCP, NCEP, NOAA, а также ряда мировых исследовательских центров и доступны для всех ученых и специалистов. К 2011 г. было выполнено обобщение глобальных данных об облачности для климатических исследований с месячным временным разрешением в период 1983—2009 гг.

Данная работа посвящена анализу климатических рядов облачности в глобальном и региональном масштабах, полученных в рамках проекта ISCCP. В начале изложен оригинальный метод анализа климатических рядов, включающий процедуру сглаживания и исследование спектральных компонентов исследуемого ряда. Далее приведены результаты исследования трендов глобального поля облачности, а также ряды для некоторых регионов

и широтных зон. В заключение представлено обсуждение полученных результатов в связи с климатическими изменениями за три последних десятилетия.

Методология анализа климатических рядов

Важной особенностью климатических рядов является их нестационарность, т. е. изменение со временем не только характера поведения, но и статистической структуры. Это обстоятельство требует разработки новых методов анализа таких рядов. Традиционные методы позволяли работать со стационарными рядами. Ниже мы рассмотрим некоторые альтернативные подходы, позволяющие извлечь более содержательную информацию из климатических рядов. Особое внимание уделяется фильтрации межгодовой изменчивости, именуемой «климатическим шумом», и выявлению медленных колебаний, которые обычно называют трендами.

До сих пор обычно шла речь о линейных трендах, характеризующих монотонное убывание или возрастание климатических характеристик. При отклонении изменений климатических индикаторов от монотонного поведения техника линейного тренда становится малоэффективной, поэтому нами предлагается метод нелинейного сглаживания, который позволяет более точно отслеживать изменения тенденций климатических рядов. Другой традиционный метод анализа спектрального состава рядов — Фурье-анализ — также предназначен для исследования стационарных процессов. В связи с этим нами предлагается использовать более современный метод вейвлет-анализа, который обеспечивает получение информации о спектральных характеристиках климатического ряда, меняющихся во времени.

Для анализа климатических рядов обычно используется техника линейного тренда для оценки общей тенденции изменений на заданном временном интервале и метод скользящего среднего для фильтрации высокочастотных колебаний, связанных с межгодовой изменчивостью, которая рассматривается как климатический шум. Техника линейного тренда эффективна в случае, когда процесс развивается более или менее монотонно. В случае

нарушения тенденции процесса оценки и даже знак тренда становятся зависимыми от выбора базового интервала времени. При анализе длинных нестационарных рядов тенденции и знаки тренда процесса меняются многократно. В таких обстоятельствах применение линейного тренда оказывается явно недостаточным для содержательного анализа рядов.

Для выявления статистически значимых изменений тенденций климатических рядов автором (Покровский, 2004) была разработана методика оценки нелинейного тренда. Предложенный подход основан на комбинации трех известных методов: 1) локального полиномиального сглаживания Кливленда (Cleveland, 1979), 2) регуляризации Тихонова (Тихонов, 1963), 3) оптимизации процедуры сглаживания на основе критерия кросс-валидации Вахбы (Wahba, 1985). Вместо обычной минимизации отклонений измерений y_i от сглаженной кривой, полученной с помощью сплайна (локального полинома) f методом наименьших квадратов, предлагается использовать сглаживающий функционал

$$S(f, \lambda) = \sum_i [y_i - f(t_i)]^2 + \lambda \int_{t_1}^{t_n} f''(t)^2 dt, \quad (1)$$

зависящий от параметра сглаживания λ и квадрата второй производной сглаживаемой функции f . Здесь, как правило, предполагается использование локальных полиномов минимальной степени с выбором «влияющих» узлов t_i , отбор которых проводится с использованием кросс-валидации.

Выбор λ и аппроксимирующего полинома (сплайна) осуществляется на основе минимизации критерия кросс-валидации Вахбы:

$$v(\lambda) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f^{\wedge(-i)}(t_i) - y_i]^2. \quad (2)$$

Здесь $f^{\wedge(-i)}$ — приближение, полученное при исключении результатов измерений y_i в i -й момент времени.

Таким образом, сглаживающая процедура определяет набор локальных полиномов минимальной степени, включая влияющие узлы, а также значение λ , которые дают минимальную погрешность при восстановлении «пропущенных» данных.

Принципиальное отличие описанной процедуры (1)—(2) от метода скользящего среднего состоит в том, что здесь, кроме сглаживания с помощью функционала (1), осуществляется критериальный отбор «влияющих узлов». В то же время, при использовании метода скользящего среднего используются все узлы вне зависимости от характера поведения временного ряда.

Стандартный Фурье-анализ временных рядов ориентирован на применение к стационарным рядам. Отклонение от стационарности влечет за собой зависимость Фурье-спектров от базового интервала анализа. Фурье-спектры зависят от фазы изучаемого процесса, которая изменяется в нестационарном случае. Для того чтобы полностью охватить все особенности нестационарного процесса, был разработан метод получения вейвлет-спектров, которые в отличие от одномерных Фурье-спектров оказываются двумерными. Остановимся на описании данного метода спектрального анализа временных рядов.

Рассмотрим временной ряд $x(t)$. Вейвлет-преобразование данного ряда имеет следующий общий вид:

$$\Psi_x^\Psi(\tau, s) = \int x(t) \psi_{\tau, s}(t) dt \quad (3)$$

с функцией спектрального преобразования

$$\psi_{\tau, s} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right), \quad (4)$$

зависящей от двух переменных: обычной спектральной переменной τ и масштабирующей переменной s . Наиболее распространенной считается функция спектрального преобразования (4) Морли, имеющая вид

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} \left[e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}} \left(\frac{t^2}{\sigma^2} - 1 \right) \right]. \quad (5)$$

Формулы (3)—(5) обеспечивают алгоритм расчета вейвлет-спектров временных рядов. Соответствующая конечно-разностная аппроксимация интеграла в (3) позволяет получить метод расчета вейвлет-спектров для климатических рядов. По данному вопросу имеется обширная литература. Можно рекомендовать, например, работу Goupillaud et al. (1984).

Располагая изложенным математическим аппаратом исследования нестационарных процессов, переходим к его применению для изучения климатических рядов.

Динамика глобальной облачности

В рамках международного проекта ISCCP получены данные о распределении облачности по ярусам (нижнему, среднему и верхнему) (Rossow, Schiffer, 1991). Кроме того, получены пространственно-временные распределения общей облачности. Все оценки даны в долях (%) облачного покрытия, т. е. покрытия облачностью заданной территории в определенный момент времени (Rossow, Garder, 1993a). При месячном обобщении речь идет о среднемесечной доле покрытия данной территории облачностью (Rossow, Garder, 1993b). Следует отметить ряд зарубежных исследований по анализу данных об облачности ISCCP и выявлению связей между динамикой облачности и важнейшими климатическими индексами (Lindzen, Chou, Hou (2001), Lindzen, Choi (2009, 2010), Pielke et al. (2007), Spencer et al. (2007)).

В настоящей работе мы ограничимся анализом данных об общей облачности. В данном разделе рассматривается анализ данных о динамике доли (%) глобального облачного покрытия, осредненной за месячный интервал.

На рис. 1 представлен весь климатический ряд общей облачности за 1983—2009 гг., а также кривые линейного тренда и результатов сглаживания, выполненного с помощью оригинального метода, изложенного выше. Доля среднемесечного глобального облачного покрытия меняется от 63 до 70 %. При этом линейный тренд показывает, что доля (%) глобальной общей облачности за

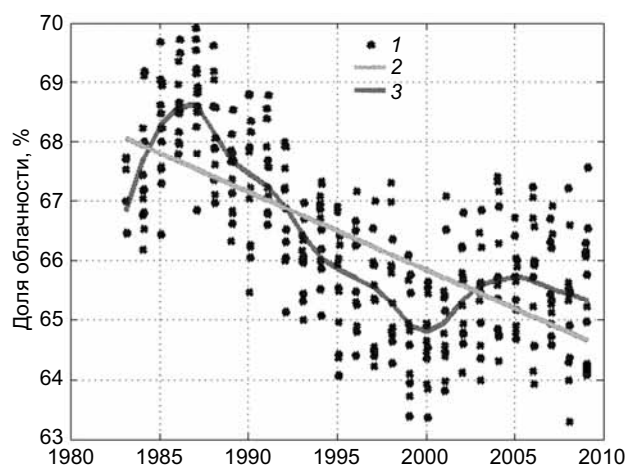


Рис. 1. Анализ ряда глобальной общей облачности по данным ISCCP.

1 — исходные данные, 2 — линейный тренд, 3 — нелинейный тренд (результат сглаживания ряда).

указанный период изменилась от 68 до 64,6 %. Таким образом, уменьшение составило 3,4 %. Кривая нелинейного тренда позволяет выделить период увеличения облачности (1983—1986 гг.) и последующее монотонное ее убывание вплоть до 2000 г. Затем следует небольшое увеличение до 2004 г., которое переходит в убывание в период 2005—2009 гг.

В работе Scafetta (2009) путем расчетов показано, что наблюдаемое уменьшение облачности за 13-летний период 1987—2000 гг. на 4 % равносильно увеличению потока приходящей солнечной радиации на $0,9 \text{ Вт/м}^2$. Интересно отметить, что, согласно отчету IPCC-2007, за период 1750—2006 гг. (после малого ледникового периода) увеличение приходящей солнечной радиации составило $1,6 \text{ Вт/м}^2$. Таким образом, за три последних десятилетия произошло заметное увеличение приходящей солнечной радиации. Возникает вопрос о том, как распределилось отмеченное изменение в облачном покрове Земли.

Изменения региональной облачности

Данные, полученные на наземной актинометрической сети, демонстрируют весьма пеструю картину при анализе трендов климатических рядов входящей солнечной радиации. До сих пор не была проведена систематизация таких исследований. Основная причина состоит в том, что до настоящего времени не стандартизированы приборы для актинометрических наблюдений в разных странах мира. Это препятствует разработке единого подхода к решению задачи стандартизации баз данных. Кроме того, актинометрическая сеть расположена преимущественно на суше, а большую часть территории Земли занимают океаны. В связи с этим спутниковые наблюдения становятся безальтернативными в задаче изучения изменений глобального климата (Rossow, Delo, Cairns, 2002). С учетом того что масштаб изменчивости поля облачности в среднем не превышает 30 км, наземная метеорологическая сеть Росгидромета, состоящая примерно из 1600 станций, может охватить не более нескольких сотых долей процента территории России (Покровский, 2004).

На рис. 2 представлены обобщенные данные о динамике облачного покрова над сушей. Линейный тренд показывает уменьшение доли облачного покрытия от 58,3 до 56 %. Таким образом, уменьшение облачности над сушей меньше, чем в масштабе всей планеты. Нелинейный тренд показывает, что тенденции изменения облачности над сушей имеют менее выраженный временной характер, чем в глобальном масштабе (см. рис. 1). Над сушей убывание облачности происходит более равномерно по времени. Значения доли облачного покрытия для облачности над сушей на 10 % ниже глобальных.

На рис. 3 даны соответствующие значения облачного покрытия над территорией всех морей и океанов в совокупности. Здесь значения облачного покрытия выше, чем над сушей, примерно на 15 %. Над акваториями уменьшение облачности также более заметно. По линейному тренду общая облачность уменьшается на 4 % (от 72,5 до 68,5 %). Изменение тенденций динамики облачности над акваториями оказывается сходным с изменением тенденций динамики в глобальном масштабе (см. рис. 1).

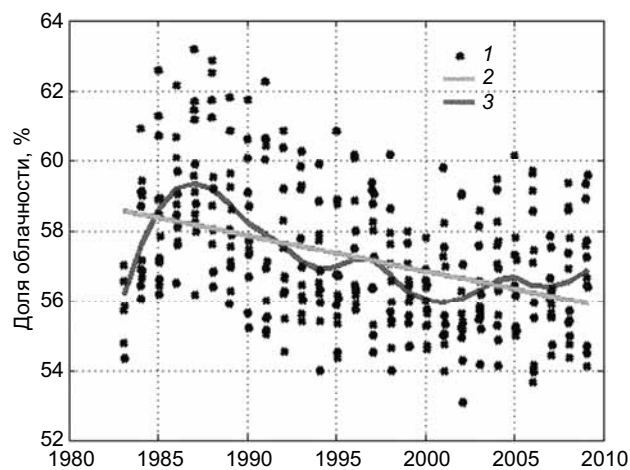


Рис. 2. Анализ ряда общей облачности над сушей по данным ISCCP.

1 — исходные данные, 2 — линейный тренд, 3 — нелинейный тренд (результат сглаживания ряда).

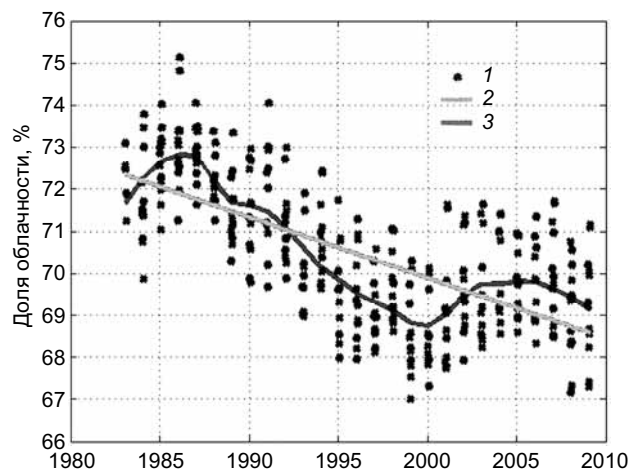


Рис. 3. Анализ ряда общей облачности над акваториями по данным ISCCP.

1 — исходные данные, 2 — линейный тренд, 3 — нелинейный тренд (результат сглаживания ряда).

Тропический пояс вызывает повышенный интерес, поскольку именно здесь наиболее интенсивно реализуется обмен влагой между атмосферой и океаном. Облачность в этом случае играет роль посредника. Поэтому очень важно знать, как меняется облачность в тропиках (Sud, Walker, Lau, 1999).

На рис. 4 представлены данные, относящиеся к широтному поясу 30° ю.ш. — 30° с.ш. В соответствии с линейным трендом в тропиках максимальное убывание облачности за рассматриваемый период составило 6 % (от 62 до 56 %). Это означает, что приток солнечной радиации в тропиках возрастает быстрее, чем в среднем по планете, и этот рост составляет более чем 1 Вт/м². Поскольку в тропиках доминируют акватории, этот факт свидетельствует о том, что увеличивающийся приток солнечной радиации влечет, прежде всего, повышение температуры поверхности океана (ТПО). Неудивительно, что сами значения облачного покрытия и их временные тенденции близки к глобальным характеристикам (см. рис. 1).

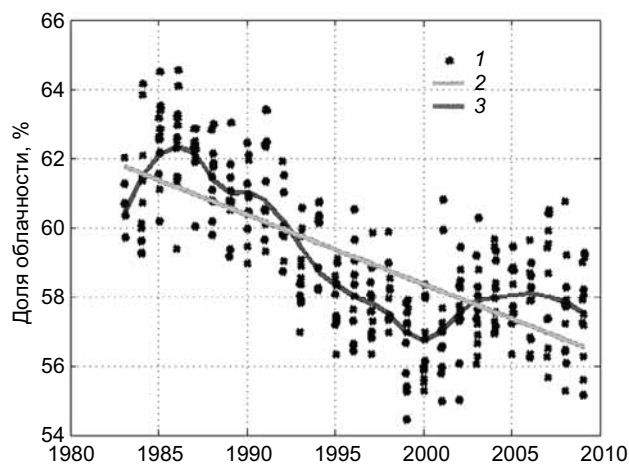


Рис. 4. Анализ ряда общей облачности в тропическом поясе по данным ISCCP.

1 — исходные данные, 2 — линейный тренд, 3 — нелинейный тренд (результат сглаживания ряда).

Поскольку наземная метеорологическая сеть наиболее развита в Европе, в качестве следующего примера на рис. 5 представлен ход общей облачности над Европой. Линейный тренд демонстрирует существенно более скромное убывание облачности — на 2,1 % (от 72,1 до 70 %). Нелинейный тренд показывает уменьшение облачности до 1997 г. и последующее медленное ее возрастание, которое лишь частично компенсирует предшествующее убывание. Таким образом, на территории Европы не следует ожидать заметных изменений приходящей солнечной радиации.

Рассматривая другие регионы, следует отметить, что наибольшее уменьшение облачности обнаруживается для территории Африки и Южной Америки. Над Антарктидой облачность возрастает, что согласуется с тенденцией увеличения ледового покрова в этой части мира.

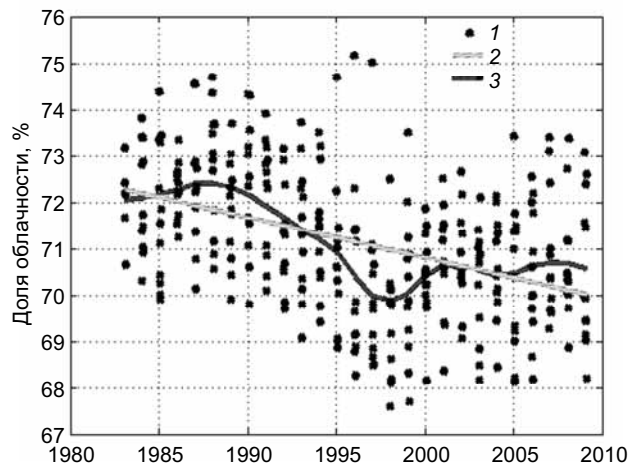


Рис. 5. Анализ ряда общей облачности над Европой по данным ISCCP.

1 — исходные данные, 2 — линейный тренд, 3 — нелинейный тренд (результат сглаживания ряда).

Спектральный анализ рядов облачности

Ряды облачности, как и другие климатические ряды, являются нестационарными, поэтому для выявления явных и скрытых периодичностей необходимо использовать адекватный аппарат спектрального анализа. В настоящее время наиболее распространен метод вейвлет-анализа, изложенный выше и использованный нами ранее в предыдущих климатических исследованиях (Покровский, 2010; Pokrovsky, 2009a, b, c, d).

На рис. 6 представлен вейвлет-спектр ряда глобальной общей облачности (см. рис. 1). По оси абсцисс отложены годы, а по оси ординат — периодичности. Значения спектральной плотности на поле рисунка отвечают одновременно и периодичностям, и годам. Среди протяженных (по времени) периодичностей выделяется годовой ход с периодичностью, равной единице. Кроме того, протяженная периодичность относится к масштабу, составляющему около 32 лет, что соответствует общей тенденции убывания облачности, которая доминирует. Следующая аномалия спектральной плотности относится к периодичности около 12 лет и привязана к периоду 1990—2005 гг. Эта периодичность описывает изменение

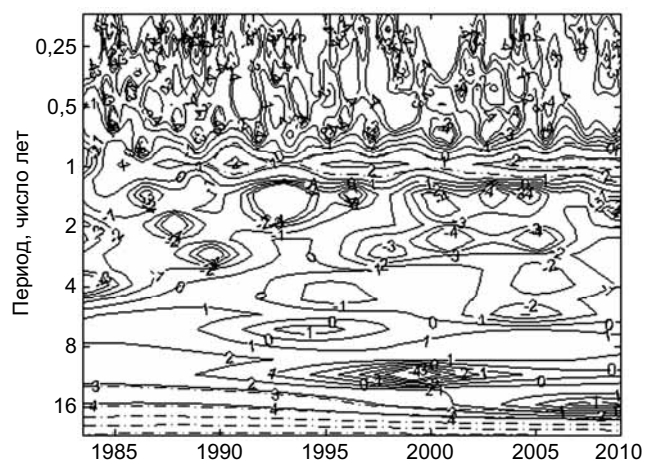


Рис. 6. Вейвлет-анализ ряда глобальной общей облачности по данным ISCCP (см. рис. 1).

монотонности убывания ряда после 2000 г. Наконец, 16-летняя периодичность обнаруживается в интервале 2004—2009 гг.

Аналогичный анализ проведен и для региональных рядов облачности. Получены сходные результаты, свидетельствующие о фундаментальности свойств рядов облачности в период потепления климата. Аппарат вейвлет-анализа может быть весьма эффективным при прогнозировании временных рядов. К сожалению, пока его эффективность не оценивалась при прогнозе климатических рядов, и это составляет предмет для исследований.

Обсуждение результатов

Представленные результаты необходимо сопоставить с основными климатическими индикаторами. Рассмотрим здесь два важнейших параметра климатической системы — температуру воздуха (ТВ) и температуру поверхности океана (ТПО). В нашем исследовании мы использовали данные о глобальных ТВ и ТПО — CRUTEM3v, представленные Центром Хэдли при Британской метеорологической службе на их официальном сайте.

Из общих соображений следует ожидать, что уменьшение облачности должно приводить к повышению как ТВ, так и ТПО. Хорошо известно, что глобальная ТВ повышалась в конце XX века и демонстрировала существенную межгодовую изменчивость в первом десятилетии XXI века. На рис. 7 представлен ход глобальной среднегодовой температуры воздуха за тот же период времени, за который имеются данные о глобальной облачности. Линейный тренд указывает на повышение глобальной ТВ на 0,6 °С. Нелинейный тренд показывает, что в начале XXI века повышение ТВ приостановилось.

Сопоставив рис. 1 и 7, можно увидеть обратную зависимость: уменьшению облачности соответствует повышение температуры, а прекращению уменьшения облачности — ослабление повышения температуры. Естественно, возникает желание вычислить коэффициент взаимной корреляции (КВК) между рядами. Можно ожидать, что он имеет отрицательный знак, но существенное абсолютное значение. Действительно, так и получается. КВК для

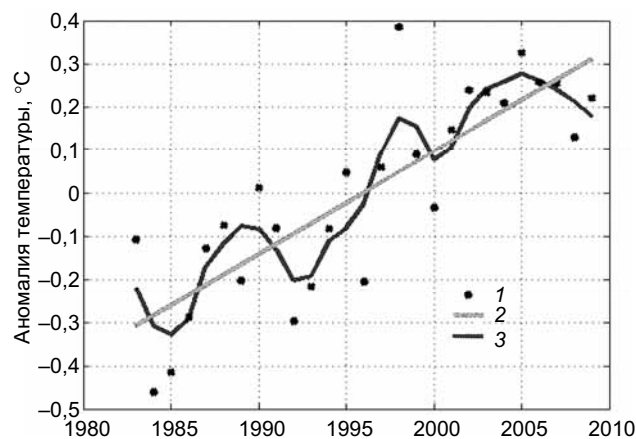


Рис. 7. Анализ ряда аномалии глобальной температуры воздуха CRUTEM3v по данным Центра Хэдли при Британской метеорологической службе.

1 — исходные данные, 2 — линейный тренд, 3 — нелинейный тренд (результат сглаживания ряда).

исходных значений составляет $-0,62$. Процедура сглаживания рядов позволяет отфильтровать «шум», характеризующий случайную межгодовую изменчивость. КВК для сглаженных рядов достигает $-0,86$.

На рис. 8 представлен ряд значений глобальной среднегодовой ТПО, которая, согласно линейному тренду, повышается на $0,4$ °C, т. е. в полтора меньше, чем ТВ. ТПО, как и ТВ, повышается в конце XX века, а в начале XXI века повышение приостанавливается. Поэтому неудивительно, что КВК между облачностью и ТПО также велико и составляет $-0,84$.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что фактор влияния облачности на изменение климата до настоящего времени был недооценен (IPCC, 2007). Одна из причин этого заключается в том, что только недавно стали доступны климатические обобщения данных проекта ISCCP. Другая причина состоит в том, что наши знания о механизмах образования и эволюции облачности являются явно недостаточными, а методы и параметризации, используемые в климатических моделях, — неточными (см. работу Rossow, Zhang, Wang (2005)).

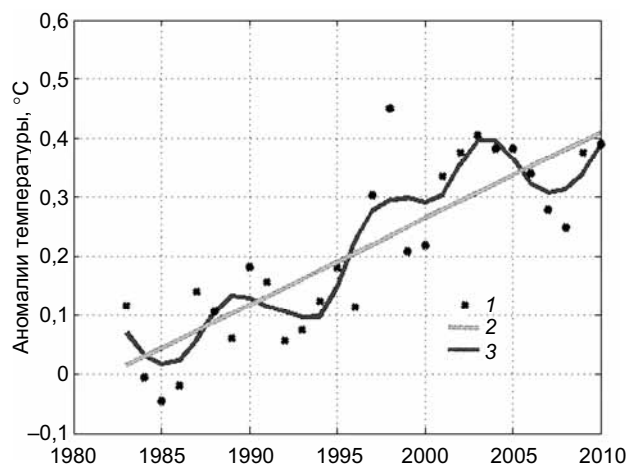


Рис. 8. Анализ ряда аномалии глобальной температуры поверхности океана CRUTEM3v по данным Центра Хэдли при Британской метеорологической службе.

1 — исходные данные, 2 — линейный тренд, 3 — нелинейный тренд (результат сглаживания ряда).

Тот факт, что одновременно с повышением температуры океана, которое влечет за собой увеличение испарения с водной поверхности, наблюдается уменьшение облачности, и прежде всего над океанами, требует критического анализа существующих представлений о механизмах образования облаков на разных высотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Покровский О. М. (2004). Композиция наблюдений атмосферы и океана. — СПб: Гидрометеиздат. 323 с.

Покровский О. М. (2010). Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исследования Земли из космоса. № 5. С. 11—24.

Тихонов А. Н. (1963). Решение обратной задачи методом регуляризации // Доклады АН СССР. Т. 153, № 1. С. 49—53.

Cleveland W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots // J. Amer. Statist. Assoc. V. 74. P. 829—836.

Goupillaud P., Grossman A., Morlet J. (1984). Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis // Geop Exploration. V. 23. P. 85—102.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. The Fourth Assessment Report (AR4). — Geneva, Switzerland: WMO (2007). 1134 p.

Lindzen R. S., Chou M.-D., Hou A. Y. (2001). “Does the Earth have an adaptive infrared iris?” // *Bull. Amer. Met. Soc.* V. 82. P. 417—432.

Lindzen R. S., Choi Y.-S. (2009). On the determination of climate feedbacks from ERBE data // *Geophys. Res. Lett.* V. 36. L16705. doi:10.1029/2009GL039628.

Lindzen R. S., Choi Y.-S. (2010). On the observational determination of climate sensitivity and its implications // *J. Geophys. Res.*, submitted February 12.

Pielke Sr. R. A. et al. (2007). Unresolved issues with the assessment of multi-decadal global land surface temperature trends // *J. Geophys. Res.*, 112, D24S08, doi:10.1029/2006JD008229

Pokrovsky O. M. (2009a). A coherency between the North Atlantic temperature nonlinear trend, the eastern Arctic ice extent drift and change in the atmospheric circulation regimes over the northern Eurasia // In: *Influence of climate change and Sub-Arctic conditions on the changing Arctic.* J. C. J. Nihoul and A. G. Kostianoy eds. — Springer Science Publ., p. 25—36.

Pokrovsky O. M. (2009b). Relationship between the SST trends in the North Pacific, the ice extent changes in Pacific sector of Arctic and corresponding shifts in the marine ecosystem in subarctic area // *Proc. Arctic Frontiers Science Conf. Tromso, Norway, 18—23 January, 2009.* Tromso University, p. 72—73.

Pokrovsky O. M. (2009c). Coherence between the winter Pacific decadal oscillation and the surface air temperature trends in the continental regions adjoining the North Pacific // *CLIVAR Exchanges.* No. 49—50. P. 32—35.

Pokrovsky O. M. (2009d). The North Atlantic SST impact on the ice extent in the Kara and Barents Seas // *Sea Technology.* V. 50, No. 9. P. 27—32.

Rossow W. B., Schiffer R. A. (1991). ISCCP cloud data products // *Bull. Amer. Met. Soc.*, 72. P. 2—20.

Rossow W. B., Garder L. C. (1993a). Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible radiances for ISCCP // *J. Climate,* 6. P. 2341—2369.

Rossow, W. B., Garder L. C. (1993b). Validation of ISCCP cloud detections // *J. Climate,* 6. P. 2370—2393.

Rossow W. B., Delo C., Cairns B. (2002). Implications of the observed mesoscale variations of clouds for Earth’s radiation budget // *J. Climate,* 15. P. 557—585.

Rossow, W. B., Zhang Y.-C., Wang J. H. (2005). A statistical model of cloud vertical structure based on reconciling cloud layer amounts inferred from satellites and radiosonde humidity profiles // *J. Climate,* 18. P. 3587—3605.

Scafetta N. (2009). Empirical analysis of the solar contribution to global mean air surface temperature change // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,* 71. P. 1916—1923. doi:10.1016/j.jastp.2009.07.007.

Schiffer R. A., Rossow W. B. (1983). The international satellite cloud climatology project (ISCCP): The first project of the World Climate Research Programme // Bull. Amer. Met. Soc., 64. P. 779—784.

Spencer, R. W. et al. (2007). Cloud and radiation budget changes associated with tropical intraseasonal oscillations // Geophys. Res. Lett., 34. L15707. doi:10.1029/2007GL029698.

Sud Y. C., Walker G. K., Lau K. M. (1999). Mechanisms regulating deep moist convection and sea-surface temperatures in the tropics // Geoph. Res. Lett., 26 (8). P. 1019—1022.

Wahba G. (1985). A comparison of GCV and GML for choosing the smoothing parameter in the generalized spline smoothing problem // Ann. Statist. V. 13. P. 1378—1402.

УДК 551.588

НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ДИНАМИКА ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ

В. Н. Павлова, О. Д. Сиротенко

Всероссийский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной метеорологии
249030 Калужская область, г. Обнинск, пр. Ленина, 82
E-mail: cxm@meteo.ru

Поступила в редакцию 1.03.2012

1. Введение

Россия, страна с одним из самых суровых климатов на планете для сельскохозяйственного производства, расположена в зоне максимально быстрых изменений климата (IPCC, 2007; Оценочный доклад, 2008). Повышение приземной температуры воздуха в этом регионе за последние 100 лет в два раза повысило средний уровень глобального потепления (Доклад Росгидромета об особенностях климата..., 2010; Груза, Ранькова, 2009). Резко континентальный климат России обусловил самую высокую среди стран — крупных производителей продовольствия межгодовую изменчивость продуктивности сельского хозяйства. Так, валовые сборы зерна в России за последние годы изменялись от 55 млн т в 2010 г. до 108 млн т в 2008 г.

Оценка последствий влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России представляется чрезвычайно актуальной для обеспечения продовольственной безопасности и обоснования аграрной политики. На это указывают следующие обстоятельства: высокая чувствительность аграрного производства России, функционирующего в экстремальных природных условиях, к изменениям климатических факторов, наличие огромного фонда неиспользованных пахотных земель, площадь которых возрастает по мере развития потепления, и, наконец, прогнозируемое на ближайшие годы существенное увеличение урожайности за

счет ликвидации технологического отставания сельского хозяйства России от лидирующих в данной области стран.

Благодаря росту внимания к проблеме изменений климата исследование влияния этих изменений на сельское хозяйство приобрели широкий размах, однако разброс модельных оценок реакции сельского хозяйства продолжает оставаться очень высоким для многих регионов мира (Reilly et al., 1996; Assessment Report, 2008). Важнейшая причина такого положения — различия в исходной метеорологической информации и способах ее обобщения. Однако претензии следует предъявлять и к методам получения оценок откликов сельского хозяйства, несовершенство которых становится особенно очевидным, когда оценивается влияние на сельское хозяйство не прогнозируемых, а наблюдаемых изменений климата. Так, по оценке Lobell et al. (2010, 2010a), валовые сборы пшеницы в России из-за ухудшения климатических условий за период с 1980 по 2008 г. снизились на 15 %. Эта оценка находится в явном противоречии со всеми известными результатами работ, выполненными в России (Assessment Report, 2008; Катцов и др., 2011), которые свидетельствуют о положительном в целом климатообусловленном тренде урожайности зерновых культур для территории России.

Цель данной работы — представить последние, обновленные оценки влияния (с использованием данных до 2010 г. включительно) происходящих изменений климата на производство зерна в России.

2. Материалы и методы

База данных

При выполнении расчетов по оценке влияния наблюдаемых изменений климата за последние три десятилетия на урожайность в работе использовался обширный фактический материал по урожайности сельскохозяйственных культур и метеорологические данные за 1951—2010 гг. для всей территории России. При расчетах в отдельных реперных точках могут быть использованы данные наблюдений сети Гидрометеорологической службы России с

1891 г. по настоящее время (120 лет). Для данной публикации расчеты выполнялись с учетом принятого административного деления России по областям (54 субъекта), федеральным округам (шесть субъектов) и крупным регионам (11 субъектов). Динамические ряды урожайности — средняя областная урожайность по данным Государственного комитета по статистике России.

Метеорологические данные представлены рядами наблюдений температуры воздуха и месячных сумм осадков с января по декабрь. В настоящей работе использована база данных Института глобального климата и экологии (ИГКЭ, Россия) для мониторинга глобального климата, содержащая временные ряды основных климатических параметров за период инструментальных наблюдений (Доклад об особенностях климата, 2010). Расчеты выполнялись на основании среднемесячных значений температуры воздуха и месячных сумм осадков по 455 гидрометеорологическим станциям, расположенным на территории бывшего СССР за период с 1975 по 2010 г. Анализируемые временные ряды содержали пропуски, составляющие примерно 7 % общего числа наблюдений, что затрудняло пространственное обобщение результатов расчетов. Для данной задачи пропуски восстановлены по индивидуальным для каждого случая уравнениям регрессии, параметры которых оценивались по результатам наблюдений данной станции и ближайшей к ней, для которой коэффициент корреляции между соответствующими временными рядами превышает заданный пороговый уровень.

Анализ динамики фактической урожайности

В настоящей работе для оценки изменений продуктивности сельскохозяйственных культур выделено 11 крупных регионов на территории России с учетом принятого административного деления, относительно однородных по почвенно-климатическим условиям. В табл. 1 представлены оценки линейных трендов рядов урожайности сельскохозяйственных культур (ц/га за десятилетний период), рассчитанные за период с 1975 по 2010 г. для регионов РФ. Анализ рассчитанных трендов позволяет сделать вывод о росте урожайности зерновых и зернобобовых культур,

озимой пшеницы и ярового ячменя практически для всех выделенных регионов (за исключением севера Центрального ФО) на территории России за последние 36 лет.

Таблица 1

Сравнительные оценки трендов (ц/га за 10 лет) фактической урожайности сельскохозяйственных культур по регионам России за периоды 1975—2006 и 1975—2010 гг.

Регион	Сельскохозяйственная культура					
	Зерновые и зернобобовые		Озимая пшеница		Яровой ячмень	
	1975—2006	1975—2010	1975—2006	1975—2010	1975—2006	1975—2010
Северо-Западный, юг	0,69	0,56	0,37	1,60	0,95	1,98
Центральный, север	-0,14	0,50	1,28	1,88	1,141	1,13
Центральный, центр	0,83	1,41	1,10	1,90	0,84	1,40
Центральный, юг	2,05	2,49	1,94	2,40	1,76	2,04
Приволжский, север	0,96	1,04	1,51	1,52	0,65	0,70
Приволжский, юг	1,20	0,00	1,27	1,02	0,89	0,36
Южный	1,75	2,30	1,88	2,97	0,19	0,21
Уральский, юг	0,23	0,31	0,33	-0,04	0,21	0,33
Сибирский, юго-запад	0,58	1,00	—	—	0,91	1,33
Сибирский, юго-восток	0,47	1,08	—	—	1,35	1,82
Дальневосточный, юг	-0,42	0,09	—	—	-0,29	-0,029
Россия	0,74	1,15	1,21	1,66	0,81	1,02

Примечание. Прочерк означает, что посевные площади озимой пшеницы малы или она не высевается.

Выполненные расчеты показали (см. табл. 1), что максимальные тренды характерны для рядов урожайности озимой пшеницы, особенно в основных регионах ее возделывания — на юге Центрального ФО и в Южном ФО. Следует заметить, что вклад линейного тренда в общую дисперсию урожайности имеет тенденцию к росту с учетом данных за последние четыре года. Мы не обсуждаем статистическую значимость полученных оценок трендов. Был получен ответ на основной вопрос: знаки трендов фактической урожайности озимой пшеницы положительны практически на всей рассматриваемой территории России.

Рассмотрим оценки линейных трендов урожайности озимой пшеницы на территории южных регионов России, где сосредоточено ее основное производство. На рис. 1 представлена динамика урожайности озимой пшеницы с 1975 по 2010 г. на территории Краснодарского и Ставропольского краев (Южный ФО) и Курской области (Центральный ФО). Соответствующие значения линейных трендов (a) за 10 лет составляют: по Краснодарскому краю 4,5 ц/га, по Ставропольскому краю 4,9 ц/га, по Курской области 1,4 ц/га.

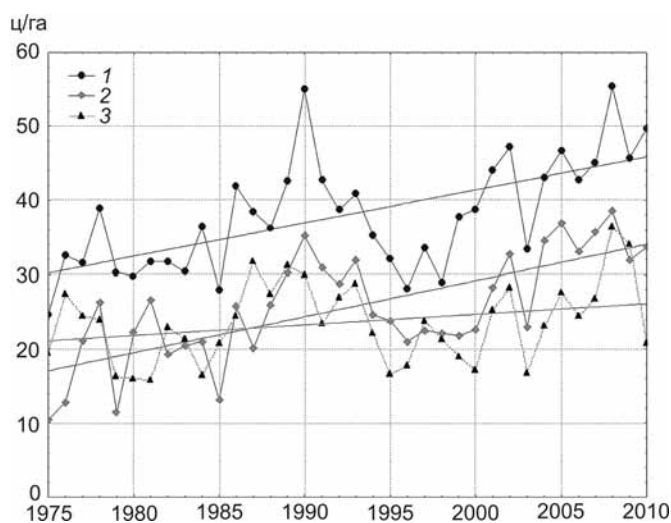


Рис. 1. Динамика средней по области урожайности озимой пшеницы за период 1975—2010 гг. по Краснодарскому краю (1), Ставропольскому краю (2) и Курской области (3).

Из рис. 1 видно, что с середины 70-х до начала 90-х годов XX века фактические тренды урожайности озимой пшеницы были положительны. Неустойчивая экономическая ситуация начала 90-х годов («перестройка») и как следствие снижение общего агротехнического уровня зернового сектора сельского хозяйства — уменьшение доз внесения минеральных и органических удобрений, сокращение применения гербицидов, неудовлетворительное состояние технической оснащённости и т. д. — привели к тому, что положительная тенденция сменилась отрицательной. Затем, с середины 90-х годов, четко обозначилась положительная динамика для рядов урожайности озимой пшеницы по областям Южного федерального округа, общая доля которых в производстве озимых зерновых в этом регионе составляет 90—95 %.

Можно предположить, что для ряда областей с положительным трендом урожайности существенное влияние на знак тренда оказывает тенденция к сокращению посевных площадей рассматриваемых сельскохозяйственных культур в результате вывода из оборота наименее плодородных и неудобных земельных участков. Так, по нашим расчетам, коэффициент корреляции между урожайностью зерновых и зернобобовых культур в целом и занимаемыми ими посевными площадями составляет: в Татарстане $-0,73$, в Липецкой и Орловской областях $-0,57$, в Рязанской области $-0,54$. В среднем в этих регионах суммарные посевные площади всех зерновых и зернобобовых культур сократились на 40 % с 70-х годов XX столетия до начала XXI столетия. В целом, две трети рассматриваемых областей, краев и республик имеют отрицательную корреляционную связь между посевными площадями и урожайностью зерновых и зернобобовых.

Регрессионные модели для оценки влияния наблюдаемых изменений климата

Региональные и национальные системы мониторинга и прогнозирования урожайности на основе систем дифференциальных уравнений, реализованные в виде динамических моделей *климат—почва—урожай*, являются достаточно сложным технологическим продуктом, что ограничивает их практическое использова-

ние. В данной работе для получения оценок влияния наблюдаемых изменений климата на приращение урожайности предлагается использовать уравнения множественной регрессии в разностной форме, а именно в форме первых разностей (Lobell, Field, 2007). Агрегированные зависимости приращения урожайности (ΔY^j) от приращения метеорологических факторов — температуры (ΔT^j) и суммы осадков (ΔP^j) — можно представить в виде

$$Y^j - Y^{j-1} = c_0 + a_i(T_i^j - T_i^{j-1}) + b_i(P_i^j - P_i^{j-1}), \quad (1)$$

где j и $(j - 1)$ — индексы текущего и предыдущего годов соответственно; $i = 1, \dots, n$ — номер месяца.

Переход к представлению временных рядов в форме первых разностей, если и не дает возможность полностью элиминировать технологические тренды в рядах урожайности за длительные промежутки времени (два-три десятилетия), то позволяет устранить тренды урожайности за ближайшие два-три года. Уравнения регрессии в форме первых разностей дают возможность получать более точные оценки влияния метеорологических факторов на урожайность (Lobell, Field, 2007; Сиротенко и др., 2007). В результате применение этого метода позволяет идентифицировать искомые зависимости со значимыми (при 5 %-ном уровне) коэффициентами корреляции для всех рассматриваемых территориальных единиц, что далеко не всегда можно получить в рамках классических уравнений регрессии.

Рассмотрим возможность применения методологии разностного подхода к построению функционалов *погода—урожай* и оценке климатообусловленных трендов урожайности основных сельскохозяйственных культур для территории России.

В табл. 2 приведены оценки коэффициентов корреляции (R) уравнений множественной регрессии для расчета урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом, ярового ячменя и озимой пшеницы и доли объясненной дисперсии урожайности. Предикторы уравнений множественной регрессии — среднемесячные значения температуры воздуха и месячные суммы осадков, а также сезонные суммы осадков и средние значения темпе-

ратуры за зимний, весенний, летний и осенний периоды. Расчеты выполнялись за период с 1975 по 2006 г. по крупным регионам в границах ФО.

Таблица 2

Оценки коэффициентов множественной корреляции (R) в уравнениях регрессии (1) для расчета средней по области урожайности зерновых и зернобобовых культур, ярового ячменя и озимой пшеницы

Регион	N	Зерновые и зернобобовые		Яровой ячмень		Озимая пшеница	
		R	$R^2 \cdot 100\%$	R	$R^2 \cdot 100\%$	R	$R^2 \cdot 100\%$
Северо-Западный, юг	124	0,570	32,5	0,605	36,6	—	—
Центральный, север	124	0,528	27,9	0,412	17,0	0,572	32,7
Центральный, центр	186	0,608	37,0	0,599	36,0	0,546	29,8
Центральный, юг	186	0,694	48,2	0,690	47,6	0,574	32,9
Приволжский, север	155	0,723	52,3	0,687	47,2	0,775	60,1
Приволжский, юг	186	0,818	66,9	0,765	58,5	0,807	65,1
Южный	155	0,775	60,1	0,780	60,8	0,698	48,7
Уральский, юг	124	0,643	41,3	0,695	48,3	—	—
Сибирский, юго-запад	186	0,544	29,6	0,524	27,5	—	—
Сибирский, юго-восток	62	0,590	34,8	0,512	26,2	—	—
Дальневосточный, юг	93	0,515	26,5	0,515	26,5	—	—
Среднее		0,636	40,4	0,616	37,9	0,662	43,8

Примечание. N — размерность выборки; прочерк означает, что данные отсутствуют.

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, с помощью предложенного подхода можно получить достаточно надежные оценки влияния наблюдаемых изменений климата на урожайность основных сельскохозяйственных культур РФ. Доля объясненной климатическими факторами дисперсии урожайности для озимой пшеницы достигает 44 %. Соответствующие оценки для зерновых и зернобобовых и ярового ячменя также достаточно высоки и составляют 40,4 и 37,9 %. По сравнению с оценками, выполненными авторами ранее (Sirotenko, Pavlova, 2010; Pavlova, 2010), более высокая точность прогностической зависимости достигнута за счет учета условий тепло- и влагообеспеченности в осенний и зимний период вегетации, особенно для озимых культур.

В табл. 3 представлены выбранные предикторы уравнений множественной регрессии и соответствующие им коэффициенты для расчета урожайности озимой пшеницы. Эти уравнения позволяют количественно оценить степень влияния изменений температурного и влажностного режимов на формирование урожайности в разных регионах. Так, повышение средней температуры мая на 1 °С повсеместно приводит к снижению урожайности озимой пшеницы — от 1,4 ц/га на территории Южного федерального округа до 0,3 ц/га на северо-западе РФ (см. табл. 3). Полученные уравнения регрессии показывают, что положительное влияние на урожайность озимой пшеницы оказывает выпадение осадков в мае на юге Центрального ФО, в Поволжье и на территории Южного ФО. Влияние наблюдаемых изменений количества осадков для достаточно увлажненных в целом северных областей Центральной России либо не проявляется, либо оказывается отрицательным. Для центральных областей (Смоленская, Брянская, Владимирская, Московская, Рязанская, Калужская) увеличение количества осадков в мае на 10 мм приводит к снижению урожайности на 0,2 ц/га (см. табл. 3). Значимое положительное влияние увеличения количества зимних осадков на урожайность выявлено в Поволжском регионе, осенних — в южных областях Поволжья и в Южном ФО.

Для зерновых и зернобобовых культур значимыми предикторами практически для всех рассмотренных регионов оказались температура воздуха и суммы осадков за май и июнь.

Таблица 3

Оценка влияния изменений температуры воздуха и атмосферных осадков на урожайность озимой пшеницы — коэффициенты a_i (ц/га на 1 °С) и b_i (ц/га на 1 мм) уравнений регрессии $\Delta y = a_i \Delta T_i + b_i \Delta P_i + c$

Регион	Период				
	Май	Июнь	Зима	Март—апрель	Осень
a_i (ц/га на 1 °С)					
Центральный, север	-0,314	—	-0,307	0,245	0,568
Центральный, центр	-0,583	—	—	—	0,641
Центральный, юг	-0,821	—	0,450	-0,435	—
Приволжский, север	-0,680	-0,533	—	—	0,916
Приволжский, юг	-1,399	—	—	—	1,107
Южный	-1,454	—	0,546	—	—
b_i (ц/га на 1 мм)					
Центральный, север	—	—	—	—	-0,021
Центральный, центр	-0,019	—	—	-0,035	-0,019
Центральный, юг	0,036	—	—	-0,016	0,014
Приволжский, север	0,092	—	0,032	—	—
Приволжский, юг	0,111	—	0,030	—	0,017
Южный	0,043	—	—	0,024	0,014

Примечание. Прочерк означает, что предиктор не входит в уравнение регрессии.

Рассчитанные оценки коэффициентов уравнений множественной регрессии для южных областей Приволжского ФО (Татарстана, Башкирии, Пензенской, Самарской, Саратовской и Оренбургской областей) представлены в табл. 4. Можно видеть, что все полученные оценки имеют высокий уровень значимости (уровень значимости для оценки коэффициентов регрессии p_{level} не превышает 1 %). Коэффициенты регрессии в стандартизованном масштабе (β) показывают, что продуктивность зерновых и зернобобовых и ярового ячменя наиболее чувствительна к изменениям июньской температуры и майских осадков в данном регионе. Для рядов урожайности зерновых и зернобобовых, которые объединяют яровые и озимые культуры, оказались значимы осадки

осеннего периода. Отметим высокий уровень дисперсии урожайности, объясняемой выбранными метеорологическими факторами: 67 % для зерновых и зернобобовых в целом и 59 % для ярового ячменя.

Таблица 4

Оценки коэффициентов уравнений регрессии для расчета урожайности зерновых и зернобобовых и ярового ячменя для южных областей Приволжского ФО

Предикторы	β	B	σ_B	$T = B/\sigma_B$	p_{level}
<i>Зерновые и зернобобовые, $R = 0,818, n = 183$</i>					
Свободный член		0,169	0,252	0,674	0,501
$T_{май}$	-0,225	-0,425	0,096	-4,404	0,000
$T_{июнь}$	-0,350	-0,728	0,109	-6,636	0,000
$R_{май}$	0,339	0,060	0,009	6,561	0,000
$R_{июнь}$	0,153	0,023	0,008	2,847	0,005
$R_{осень}$	-0,175	-0,018	0,005	-3,944	0,000
<i>Яровой ячмень, $R = 0,765, n = 183$</i>					
Свободный член		0,156	0,327	0,47828	0,633
$T_{май}$	-0,162	-0,354	0,125	-2,83618	0,0056
$T_{июнь}$	-0,403	-0,973	0,142	-6,84480	0,000
$R_{май}$	0,319	0,066	0,012	5,61419	0,000
$R_{июнь}$	0,149	0,026	0,011	2,49044	0,014

Примечание. R — множественный коэффициент корреляции, n — объем выборки, B — коэффициент регрессии, β — коэффициент регрессии в стандартизованном масштабе, σ_B — стандартная ошибка B , p_{level} — уровень значимости для оценки B .

3. Результаты и обсуждения

С помощью методологии разностного подхода оценены обусловленные изменениями температуры воздуха и осадков тренды урожайности основных сельскохозяйственных культур по регио-

нам России. Перейдем к анализу результатов на основании полученных уравнений.

Следует отметить, что полученные авторами уравнения множественной регрессии позволяют оценить влияние не только наблюдаемых за последние десятилетия, но и ожидаемых в ближайшие годы изменений климата на урожайность зерновых и зернобобовых культур по регионам России. Однако точность оценок и прогнозов зависит, с одной стороны, от точности используемых уравнений и, с другой стороны, от надежности данных об ожидаемых изменениях климата.

Оценки трендов температуры воздуха по крупным регионам России за период с 1975 по 2010 г. приведены в табл. 5. Представлены оценки по сезонам и по месяцам, которые необходимы для расчетов по полученным уравнениям регрессии (см. табл. 4). Средние по области оценки трендов температуры и осадков в большей степени, чем оценки по выделенным крупным регионам, подвержены влиянию рельефа и других локальных факторов, связанных с особенностями расположения отдельных метеорологических станций. Региональные оценки за счет большего пространственного сглаживания имеют более высокое отношение сигнал/шум, и, следовательно, полученные на их основании оценки изменений урожайности более обоснованы для использования в качестве прогноза на ближайшие годы. Тренды температуры воздуха как по отдельным месяцам, так и по сезонам года положительны практически для всей рассматриваемой территории РФ за исключением юго-запада Сибири (см. табл. 5). Как следует из данных, представленных в табл. 5, на европейской части РФ минимальные положительные тренды температуры воздуха наблюдались в мае, а в сезонном разрезе — весной. По оценкам, выполненным авторами ранее (Сиротенко, Павлова, 2008), тренды температуры воздуха в мае за период с 1975 по 2004 г. имели отрицательный знак.

В отличие от температуры воздуха тренды осадков разнонаправлены по знаку и имеют большую изменчивость по территории. Отметим как положительный фактор для сельского хозяйства, что за последние три десятилетия количество выпавших осадков в мае—июне и за весенний период на территории

Таблица 5

**Линейные тренды среднемесячной температуры воздуха (°С/10 лет) и
месячных сумм осадков (мм/10 лет) за период с 1975 по 2010 г.**

Регион	Период							
	Март	Апрель	Май	Июнь	Зима	Весна	Лето	Осень
<i>Среднемесячная температура воздуха, °С/10 лет</i>								
Северо-Западный, юг	0,40	0,70	0,12	0,27	0,95	0,40	0,63	0,42
Центральный, север	0,48	0,60	0,27	0,33	0,79	0,45	0,63	0,56
Центральный, центр	0,64	0,54	0,16	0,27	0,76	0,45	0,66	0,52
Центральный, юг	0,85	0,49	0,19	0,43	0,71	0,51	0,84	0,62
Приволжский, север	0,61	0,48	0,31	0,24	0,49	0,47	0,51	0,62
Приволжский, юг	1,04	0,35	0,03	0,43	0,56	0,48	0,62	0,68
Южный	0,73	-0,05	0,17	0,51	0,38	0,29	0,73	0,53
Уральский, юг	0,71	0,12	0,50	0,03	0,26	0,45	0,25	0,64
Сибирский, юго-запад	0,90	0,43	0,61	-0,14	-0,10	0,65	0,10	0,30
Сибирский, юго-восток	0,68	0,54	0,53	0,45	0,16	0,58	0,45	0,18
Дальневосточный, юг	0,44	0,24	0,26	0,41	0,44	0,31	0,26	0,44
<i>Месячные суммы осадков, мм/10 лет</i>								
Северо-западный, юг	2,0	-2,6	4,7	1,1	4,0	4,1	1,0	-3,3
Центральный, север	0,9	-0,5	-2,4	-5,9	-3,5	-2,0	-13,9	-5,5
Центральный, центр	1,1	-1,5	2,9	-4,7	-2,5	2,5	-12,6	1,3
Центральный, юг	2,0	-3,3	-1,5	-1,6	-2,8	-15,0	1,3	-1,3
Приволжский, север	5,5	-2,8	1,5	-0,7	1,9	4,2	-10,6	-5,2
Приволжский, юг	6,1	-0,6	2,2	-4,3	-0,7	7,6	-12,5	-4,7
Южный	8,8	-3,0	5,1	2,1	-1,2	10,8	-4,0	9,6
Уральский, юг	4,5	-1,4	5,4	2,4	1,5	8,5	-2,9	-0,4
Сибирский, юго-запад	0,5	2,8	1,3	0,1	2,4	4,2	4,2	-1,0
Сибирский, юго-восток	0,8	1,1	0,0	0,4	0,8	1,5	6,6	4,3
Дальневосточный, юг	0,7	5,2	-1,3	3,3	4,0	7,2	4,3	-2,2

Приволжского и Южного, а также на юге Уральского ФО возрастало. Весенние суммы осадков увеличивались практически по всей территории России с развитым сельским хозяйством за исключением северных и южных областей Центрального ФО.

Наличие разнонаправленных трендов количества осадков для отдельных месяцев как на территории отдельных областей, краев, республик, так и на территории крупных регионов обуславливает достаточно сложную картину реакции сельского хозяйства на динамику климатических условий последних десятилетий. Максимальная скорость повышения летней температуры зафиксирована на юге Центрального ФО (0,84 °C/10 лет), а минимальная (0,10 °C/10 лет) — на юго-западе Сибири. Отметим, что на европейской части РФ летние суммы осадков уменьшались практически повсеместно. Максимальная скорость уменьшения летних сумм осадков отмечена на юге Поволжья и в Центральном ФО (порядка 12—14 мм/10 лет). В Сибири и на Дальнем Востоке, как показывают данные (см. табл. 5), количество осадков возрастает практически во все сезоны года.

Рассмотрим результаты расчетов оценок изменения продуктивности при изменении климата за последние десятилетия на территории зернопроизводящих регионов России. Обусловленные климатом изменения урожайности за период современного потепления (начиная с 70-х годов прошлого века) представлены в табл. 6.

Зерновые и зернобобовые культуры. За последние 36 лет урожайность всех зерновых и зернобобовых культур в результате изменений климата возросла на большей части России. Лишь в трех регионах (на юге Приволжского ФО, а также в центральной и южной частях Центрального ФО) отмечено снижение урожайности, скорость которого не превышала 1,2 % за десятилетие. Урожайность зерновых культур возросла на юге европейской части России, а также на всей азиатской части России — на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке (табл. 6). Урожайность зерновых и зернобобовых культур увеличивалась за счет изменений климатических условий на 0,2—6,1 % за десятилетие, или на 0,7—22 % за последние 36 лет (относительно среднего уровня за период 1975—2010 гг.). Средняя оценка повышения урожайности для территории России оценивается значением порядка 1,2 % за десятилетие, или 4,5 % за период с 1975 по 2010 г.

Таблица 6

**Обусловленные климатом изменения урожайности (ΔY)
сельскохозяйственных культур сельскохозяйственных регионов РФ
за период с 1975 по 2010 г.**

Регион	Зерновые и зернобобовые		Яровой ячмень		Озимая пшеница	
	ц/га за 10 лет	% за 10 лет	ц/га за 10 лет	% за 10 лет	ц/га за 10 лет	% за 10 лет
Северо-Западный, юг	0,20	1,6	0,0	0,0	—	—
Центральный, север	0,22	2,0	-0,0	-0,3	0,31	2,2
Центральный, центр	-0,17	-1,2	-0,17	-1,1	0,28	1,6
Центральный, юг	-0,15	-0,8	-0,46	-2,4	0,07	0,3
Приволжский, север	0,00	-0,0	-0,05	-0,3	0,61	3,6
Приволжский, юг	-0,07	-0,5	-0,20	-1,5	0,88	4,9
Южный	0,44	1,9	-0,07	-0,4	0,83	3,1
Уральский, юг	0,82	6,1	0,21	1,4	—	—
Сибирский, юго-запад	0,35	2,8	0,25	1,9	—	—
Сибирский, юго-восток	0,28	2,3	0,37	3,0	—	—
Дальневосточный, юг	0,22	0,2	-0,0	-0,0	—	—
Россия	0,17	1,2	0,004	0,032	0,50	2,6

Яровой ячмень. Как можно видеть из данных, представленных в табл. 6, положительные тренды климатообусловленной урожайности ярового ячменя прослеживаются лишь на азиатской части России — на Урале и в Сибирском регионе. На юго-востоке Сибири оценка линейного тренда урожайности ярового ячменя составляет 3 % за десятилетие. В то же время, на всей европейской части России наблюдаемые изменения климатических условий привели к снижению урожайности ярового ячменя от 0,3 до 2,4 % за 10 лет на севере и юге Центрального ФО соответственно. В целом же, отрицательные тренды урожайности ярового ячменя на европейской части России, обусловленные изменением климата, компенсируются положительными трендами на азиатской части России. В ре-

зультате суммарная оценка для всей территории России близка к нулю, т. е. изменения агрометеорологических условий за последние десятилетия практически не повлияли на урожайность ярового ячменя для территории России в целом.

Озимая пшеница. Прошедший тридцатилетний период был благоприятным по агрометеорологическим условиям для озимой пшеницы, урожайность которой повышалась во всех регионах ее возделывания на территории России. При этом максимальные темпы повышения продуктивности озимой пшеницы (3,1 % за десятилетие) наблюдаются на Северном Кавказе — в регионе, дающем основной валовой сбор этой культуры. Высокие темпы повышения урожайности озимой пшеницы наблюдались на юге Поволжья. В целом по России повышение урожайности озимых зерновых культур, обусловленное изменением климата, составило 0,05 ц/га, или 2,6 % за десятилетие в период с 1975 по 2010 г.

На рис. 2 представлено пространственное распределение рассчитанных значений трендов урожайности озимой пшеницы, обусловленных изменением климата, по крупным регионам всей земледельческой зоны РФ за три десятилетия (с 1975 по 2010 г.).

В заключение представим оценки влияния наблюдаемых изменений климата на продуктивность кормовых и технических

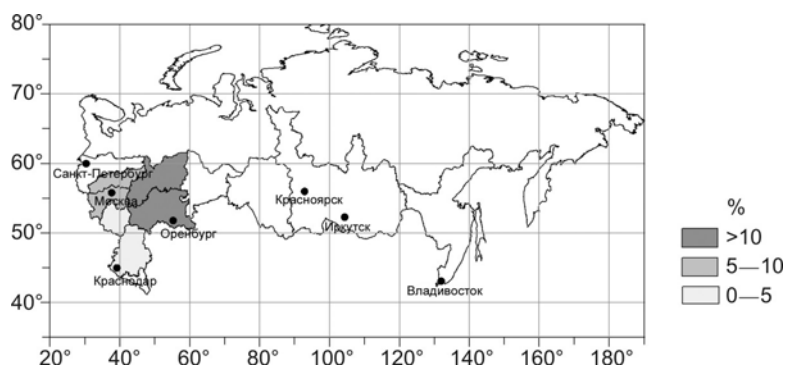


Рис. 2. Динамика (тренд) урожайности (%) озимой пшеницы, обусловленная изменением климата, относительно средней урожайности за период 1975—2010 гг.

культур. В табл. 7 приведены климатообусловленные тренды урожайности подсолнечника, сахарной свеклы и кукурузы. Расчеты выполнялись для европейской части России за период с 1990 по 2006 г. Из таблицы видно практически повсеместное повышение урожайности подсолнечника и сахарной свеклы, обусловленное изменением климата. Заметное повышение урожайности кукурузы в Приволжском и Центральном ФО (до 2,2 ц/га за 10 лет) сопровождалось уменьшением урожайности этой культуры в Южном ФО из-за увеличения засушливости в летний период.

Таблица 7

Климатообусловленные тренды (ц/га за 10 лет) урожайности кормовых и технических культур за период 1990—2006 гг.

Сельскохозяйственная культура	Федеральный округ			
	Центральный нечерноземный	Центральный черноземный	Приволжский	Южный
Подсолнечник	1,32	0,29	0,35	0,37
Сахарная свекла	—	6,0	5,32	7,78
Кукуруза	1,06	1,25	2,24	-2,92

Выводы

Проведенный анализ позволяет заключить, что тенденция повышения урожайности зерновых и зернобобовых культур, озимой пшеницы и ярового ячменя на территории России, обуславлившая положительные линейные тренды урожайности за период 1975—2010 гг., в определенной мере может быть объяснена улучшением климатических условий за этот период.

Выполненные расчеты показали, что на большей части территории земледельческой зоны России наблюдаемые за последние 36 лет изменения климата обусловили тенденцию к повышению урожайности озимой пшеницы на территории ее возделывания — от 1 % на юге Центрального ФО до 17 % на юге Поволжья. Для

зерновых и зернобобовых культур и ярового ячменя вывод не такой однозначный. Изменение агрометеорологических условий за период с 1975 по 2010 г. на территории Южного и Уральского ФО, в Сибири и на Дальнем Востоке, а также в Северо-Западном ФО и на севере Центрального региона европейской части России привело к повышению урожайности зерновых и зернобобовых на 1—22 %. Следует заметить, что на этой территории сосредоточено 35 % валового производства зерновых и зернобобовых культур. Повышение урожайности ярового ячменя, обусловленное изменением климата, на территории Уральского ФО и в Сибирском регионе (30 % валового производства ячменя) составило 5—11 % по сравнению со средним уровнем за 1975—2010 гг. В то же время, на значительной части европейской части России выявлена слабо выраженная тенденция к снижению урожайности ярового ячменя, а также зерновых и зернобобовых культур, обусловленная изменениями климата (порядка 1 % за 10 лет).

По оценкам, приведенным в работе Lobell et al. (2010, 2010a), на территории России продуктивность пшеницы снизилась на 15 % за период с 1980 г. Этот, по-видимому, ошибочный вывод был сделан либо в результате использования слишком агрегированной зависимости *погода—урожай* для столь обширного региона, либо за счет недостаточно точной привязки глобальных сеточных метеорологических данных к действительному распределению посевов зерновых культур по территории России.

Вместе с тем, необходимо иметь в виду, что все оценки получены авторами для современного агротехнического уровня сельскохозяйственного производства без учета возможности его адаптации к наблюдаемым и ожидаемым изменениям климата. Исследования последних лет показали, что потенциал адаптации мирового сельского хозяйства, и особенно сельского хозяйства России, к современному потеплению климата достаточно велик (Schimmelpfennig et al., 1996; Reilly et al., 1996; Assessment Report, 2008). Оценки возможного повышения продуктивности сельского хозяйства за счет его адаптивной интенсификации представлены в работе Sirotenko et al. (2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. (2009). Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации. // *Метеорология и гидрология*. № 11. С. 15—29.

Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 г.: URL: <http://climatechange.ru>.

Катцов В. М., Мелешко В. П., Хлебникова Е. И., Школьник И. М. (2011). Оценка климатических воздействий на сельское хозяйство России в первой половине XXI века: современные возможности физико-математического моделирования // *Агрофизика*. № 3. С. 22—30.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008). Том II. Последствия изменений климата. — М.: Росгидромет. 288 с.

Павлова В. Н. (2010). Анализ и оценка влияния климатических условий последних десятилетий на урожайность зерновых культур в земледельческой зоне России / В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. V. XXIII. — М., ИГКЭ. С. 215—230.

Сиротенко О. Д., Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Абашина Е. В., Павлова В. Н. (2007). Современные климатические изменения теплообеспеченности, увлажненности и продуктивности агросферы России // *Метеорология и гидрология*. № 8. С. 90—103.

Сиротенко О. Д., Павлова В. Н. (2003). Оценка влияния изменений климата методом пространственно-временных аналогов // *Метеорология и гидрология*. № 8. С. 89—99.

Сиротенко О. Д., Павлова В. Н. (2010). Новый подход к идентификации функционалов погода—урожай для оценки последствий изменений климата // *Метеорология и гидрология*. № 2. С. 92—100.

Сиротенко О. Д., Клещенко А. Д., Павлова В. Н., Абашина Е. В., Семендяев А. К. (2011). Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // *Агрофизика*. № 3. С. 31—39.

Стратегический прогноз изменения климата Российской Федерации на период до 2010—2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России (2005). — М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 28 с.

IPCC, 2007. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ S. Solomon et al. eds. — Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Reilly J. et al. (1996). Impacts, adaptation and mitigation of climate change / Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change / R. T. Watson, M. C. Zinyowera, R. H. Moss, eds. — Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Lobell D. B., Field C.B. (2007). Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming // *Environ. Res. Let.* V. 2. P. 1—7.

Lobell D. B., Schlenker W., Roberts J. C. (2011). Climate trends and global crop production since 1980 // *Scienceexpress* 5 May 2011. www.scienceexpress.org

Lobell D. B., Schlenker W., Roberts J. C. (2011). Supporting online material for climate trends and global crop production since 1980. www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1204531/DC1.

Sirotenko O. D. (2001). Crop modelling: advances and problems // *Agronomy J.* V. 93. P. 650—653.

Sirotenko O. D., Abashina E. V., Pavlova V. N. (1997). Sensitivity of the Russian agriculture in climate, CO₂ and tropospheric ozone concentrations and soil fertility // *Climatic change.* V. 36. P. 217—234.

Schimmelpfennig D., Lewandrowski J., Reilly J., Tsigas M., Parry I. (1996). Agricultural adaptation to climate change: Issues of long run-sustainability / In: *An Economic Research Service Report.* P. 1—57.

УДК 630:551.583(470+570)

**ОПЫТ АГРОКЛИМАТИЧЕСКОГО И ОПЕРАТИВНОГО
МОНИТОРИНГА ЗАСУШЛИВЫХ ЯВЛЕНИЙ В РОССИИ
ПО НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ**

Е. К. Зойдзе, О. И. Задорнова, Т. В. Хомякова

Всероссийский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной метеорологии
249038 Обнинск, пр. Ленина, 82
E-mail: zadornovaoi@gmail.com

Поступила в редакцию 9.12.2011

Поступила после доработки 30.03.2012

Засушливые явления всегда представляли проблему для эффективного использования сельскохозяйственных угодий в России. Еще Н. И. Вавилов отмечал, что «особенностью земледелия в России является широкая и частая повторяемость такого неблагоприятного явления, как засуха» (Вавилов, 1931).

Засушливым явлениям посвящено очень много научных публикаций, разработано множество показателей и критериев для их оценки и мониторинга с целью установления категории по интенсивности.

В последнее время наиболее активно проблемами оценки и мониторинга засушливых явлений занимались сотрудники Гидрометцентра России и ВНИИСХМ. Гидрометцентр России занимается, главным образом, обеспечением центральных правительственных учреждений РФ информацией о засушливых явлениях по территории РФ (А. И. Страшная), а в Центре мониторинга засух (ЦМЗ) ВНИИСХМ проводится ежедекадный мониторинг возникновения и развития засушливых явлений по территории РФ и для стран СНГ в период май—сентябрь.

Приведенный ниже материал отражает опыт ЦМЗ по применению методологии оценки и мониторинга засушливых явлений.

Нами разработана единая система мониторинга засушливых явлений по наземным данным. Полный мониторинг засушливых явлений включает агроклиматический и оперативный мониторинг этих явлений, а также агроклиматические и агрометеорологические рекомендации по ослаблению отрицательных воздействий на сельскохозяйственное производство (Зоидзе, 2004).

Одной из основных задач агроклиматического мониторинга засушливых явлений (МЗЯ) является создание и регулярное обновление научно-прикладных справочников (НПС) по засушливым явлениям. Во ВНИИСХМ впервые в России создан единый по всей России Научно-прикладной справочник по засушливым явлениям (Зоидзе, Сухарева, 1991). Целью Справочника является систематизация и обобщение информации по засушливым явлениям применительно к запросам сельского хозяйства. В Справочнике отражены такие засушливые явления, как высокая температура воздуха, бездождные (засушливые) периоды, атмосферные и почвенные засухи, суховеи, оценка потерь (снижения) урожайности в зависимости от засушливых условий. Эти явления описываются различными показателями, которые представлены их средними многолетними значениями и вероятностными характеристиками. По материалам НПС исследованы различные закономерности возникновения и развития засушливых явлений на территории РФ (Зоидзе, Хомякова, 2000).

Обновление НПС по засушливым явлениям осуществляется по разработанной во ВНИИСХМ новой методологии. В новой редакции Справочник будет состоять из публикуемого раздела и раздела в электронном виде. Первый предусматривает сбор, обработку и хранение средних многолетних фактических агроклиматических данных по гидрометеорологическим станциям, а второй результаты агроклиматического мониторинга агроклиматических показателей по скользящим 20-летиям (Зоидзе, Хомякова и др., 2010).

Материалы НПС по засушливым явлениям используются для разработки метода мониторинга засушливых явлений с помощью агроклиматического атласа. Мониторинг засушливых явлений на основе агроклиматических атласов будет наглядно демонстриро-

вать особенности изменения засушливых явлений в различных регионах страны, обусловленного изменением климата. В отделе агроклиматических исследований и автоматизированных систем обработки метеорологической информации подготовлены агроклиматические атласы (АГКА) по всей территории России, в том числе по федеральным округам (ФО) (Атлас, 2005, 2007, 2008).

Основная часть территории России, подверженной воздействию почвенных засух, расположена на юге европейской части страны в пределах Южного, Северо-Кавказского и Приволжского ФО (ЮФО, СКФО и ПФО). Именно в этих ФО засухи наиболее интенсивны, а вероятность их возникновения максимальна. Достаточно высок риск наступления почвенной засухи на юге Центрального ФО (ЦФО), а также в ряде субъектов на юге Уральского и Сибирского ФО (УФО и СФО). Известно, что повышенная засушливость характерна для тех регионов, где сосредоточены основные площади сельскохозяйственного производства страны.

В АГКА почвенные засухи описываются по разработанным показателям (Зоидзе, Сухарева, 1991). По материалам наблюдений на сети станций Росгидромета установлено, что если запасы продуктивной влаги в почве сохраняются на уровне 5 мм и менее в слое почвы 0—20 см, а также 25 мм и менее в слое почвы 0—100 см в течение двух и более декад, это оказывает катастрофическое влияние на состояние зерновых культур. Эти показатели приняты в качестве критерия очень сильной почвенной засухи. Сильная засуха характеризуется влагосодержанием в пахотном слое почвы 10 мм и менее, а в метровом слое — 35 мм и менее. При содержании влаги в пахотном слое не более 15 мм и в слое 0—100 см не более 50 мм почвенные засухи относят к засухам средней интенсивности. В то же время, эти показатели не во всех случаях отражают критическое состояние почвенной влаги, особенно при оценке засух средней интенсивности, однако они характеризуют засушливые явления.

Для описания пространственного и временного распределения засух используются такие показатели, как вероятность (%) почвенных засух различной интенсивности на некоторые даты наступления фаз развития зерновых культур. В Атласах (2005,

2007, 2008) представлены карты «Риск почвенных засух под озимыми зерновыми культурами на дату сева», «Риск почвенных засух под озимыми зерновыми культурами на дату выхода в трубку», «Риск почвенных засух под ранними яровыми зерновыми культурами на дату сева и на дату выхода в трубку» и «Риск почвенных засух под поздними яровыми зерновыми культурами на дату сева и на дату выхода в трубку».

Важным подходом в системе методов агроклиматического мониторинга засух и засушливых явлений является исследование динамики вероятности (%) лет с атмосферными засухами различной интенсивности по данным длинных рядов данных наблюдений на сети станций.

На рис. 1 и 2 показана динамика вероятности (%) лет с атмосферными засухами различной интенсивности по Саратовской и Оренбургской областям за период с 1891 по 2010 г. Интенсивность атмосферных засух оценивалась по среднему значению гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) за май—июнь. При этом рассматривались две категории интенсивности засух: высокая ($\text{ГТК} \leq 0,39$) и средняя ($\text{ГТК} = 0,40 \dots 0,70$).

Динамика вероятности лет с атмосферными засухами изучалась за 119-летний период (с 1891 по 2010 г.). Расчеты проводились по следующим скользящим 20-летним периодам: 1891—1910, 1892—1911, ..., 1991—2010 гг. Анализ показывает, что в Саратовской области (см. рис. 1 и 2) в целом общая тенденция вероятности лет с засухами, несмотря на колебания этого показателя во времени, характеризуется снижением. Естественно, что при этом в других субъектах проявляются свои особенности.

В Оренбургской области, например, довольно продолжительное время наблюдалось увеличение вероятности лет с атмосферными засухами средней интенсивности. Однако в последнее время, начиная примерно с 76-го скользящего 20-летия (1966—1985 гг.), отмечается резкое уменьшение рассматриваемого показателя.

Предлагаемый метод позволяет определить тенденцию изменения динамики вероятности лет с атмосферной засухой по любой таксономической единице (станция, административный район, субъект, округ и т. д.), а также выработать соответствующие

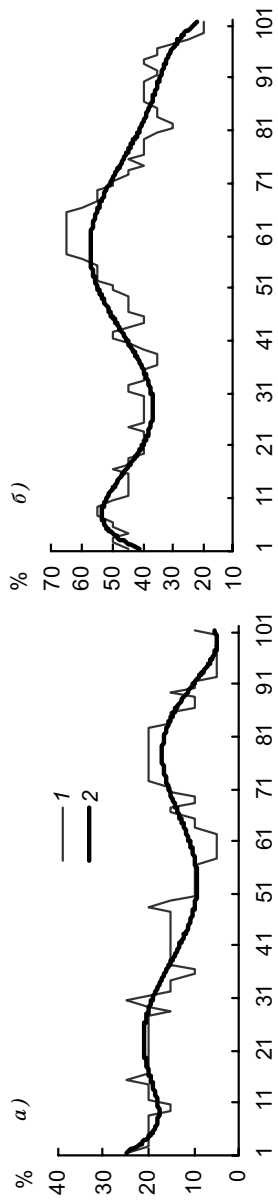


Рис. 1. Динамика вероятности (%) лет с атмосферной засухой высокой (а) и средней (б) интенсивности по территории Саратовской области за май—июнь.

1 — фактические данные, 2 — расчетные данные.

По оси абсцисс указан порядковый номер скользящих 20-летних с 1891 по 2010 г.

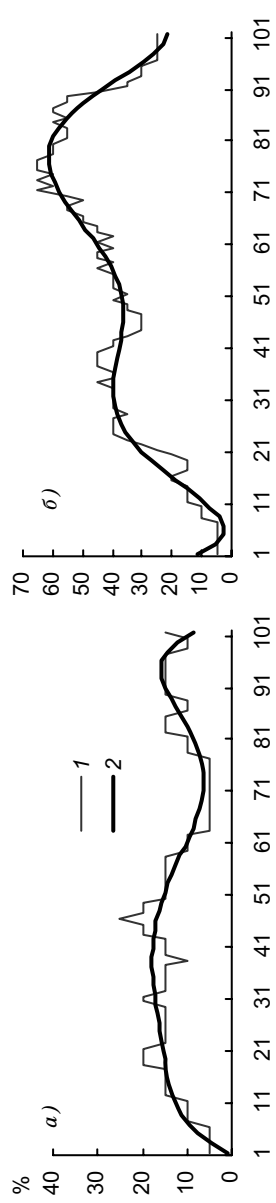


Рис. 2. Динамика вероятности (%) лет с атмосферной засухой высокой (а) и средней (б) интенсивности по территории Оренбургской области за май—июнь.

1 — фактические данные, 2 — расчетные данные.

По оси абсцисс указан порядковый номер скользящих 20-летних с 1891 по 2010 г.

рекомендации учета изменения вероятности лет с атмосферной засухой для практической деятельности при ведении сельскохозяйственного производства.

Оперативный мониторинг засушливых явлений (МЗЯ) включает мониторинг возникновения и развития засушливых явлений, подготовку и выпуск декадного бюллетеня (ДБ) засушливых явлений и создание и ведение фонда агроклиматических характеристик засушливых явлений.

Методика мониторинга возникновения и развития засушливых явлений представляет собой автоматизированную оперативную систему оценки засух (АОСОЗ) (Зоидзе, Хомякова, 2002). Система позволяет регулярно отслеживать появление и развитие засух по пунктам наблюдений с шагом в одну декаду в течение всего вегетационного периода. Она базируется на сочетании уникального опыта России по разработке физически обоснованных показателей для описания интенсивности засух с современными научно-техническими знаниями, возможностями информационного обеспечения и вычислительных технологий. АОСОЗ впервые в мировой практике предусматривает ежедекадную (в период апрель—октябрь) комплексную оценку развития засух различной интенсивности с учетом основных ее составляющих — атмосферной, почвенной и суховеев, а также выдачу синтетического (обобщенного) результата по пунктам наблюдений. На основе этих данных возможна подготовка разнообразной информации:

— табличных материалов с категориями засух и подекадной динамикой охвата территории (например, в рамках субъекта РФ), подверженной засухам различной интенсивности за любой период;

— серии карто-схем с комплексной оценкой развития засух по декадам с выделением зон с засухами различной интенсивности.

Для описания засух в АОСОЗ приняты следующие показатели:

- 1) гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК);
- 2) показатель увлажнения Д. И. Шашко (Md);
- 3) показатель влагообеспеченности А. В. Процорова ($V\%$);

4) число дней с относительной влажностью воздуха 30 % и менее (N_0);

5) число дней с максимальной температурой воздуха выше 30 °С (N_T);

6) запасы продуктивной влаги под озимыми, ранними яровыми и поздними яровыми сельскохозяйственными культурами в слоях почвы: 0—20 см (W_{0-20}), 0—50 см (W_{0-50}), 0—100 см (W_{0-100}).

Показатели ГТК, Md и V могут быть определены по стандартным метеорологическим данным: количеству осадков (R мм), температуре воздуха (T °С), парциальному давлению водяного пара в воздухе (d гПа), запасам продуктивной влаги в почве (W мм), числу дней с относительной влажностью воздуха 30 % и менее (N_0), числу дней с максимальной температурой воздуха выше 30 °С (N_T). Эти данные имеются в декадных агрометеорологических телеграммах, они позволяют приведенные показатели рассчитывать в оперативном режиме за любую (i -ю) декаду.

АСОЗ предусматривает классификацию засух по пяти категориям интенсивности: очень сильная, сильная, средняя, слабая и отсутствие засухи. Она производится по обобщенному значению оценок, выполненных по отдельным показателям. Комплексование осуществляется с помощью алгоритмов процедуры распознавания образов (Жуков и др., 1989) путем осреднения мер близости фактического значения каждого показателя за i -ю декаду с критерием (граничными значениями) этих же показателей по каждой категории (табл. 1).

Процедура мониторинга развития засух предполагает ряд последовательных действий:

— формируются массивы исходных фактических данных для расчета показателей оценок развития засух за i -ю декаду из агрометеорологических телеграмм за i -ю, $(i-1)$ -ю и $(i-2)$ -ю декады;

— рассчитываются показатели ГТК, Md , V %;

— составляются сводные таблицы фактических значений показателей оценки развития засух за i -ю декаду;

— по каждому пункту наблюдений выделяется средняя мера близости с максимальным значением из всех категорий (класса) по интенсивности;

Таблица 1

**Граничные значения показателей при дифференциации засух
на классы**

Показатель	Интенсивность засухи				
	Очень сильная (класс 1)	Сильная (класс 2)	Средняя (класс 3)	Слабая (класс 4)	Отсутствие засухи (класс 5)
ГТК	0—0,19	0,20—0,39	0,40—0,60	0,61—0,75	0,76—5,0
<i>Md</i>	0—0,09	0,10—0,19	0,20—0,30	0,31—0,40	0,41—3,0
<i>V</i> %	0—40	41—50	51—60	61—70	71—100
<i>N₀</i>	8—11	6—7	3—5	1—2	0
<i>N_T</i>	8—11	6—7	3—4	1—2	0
<i>W_{0–20}</i> мм	0—5	6—10	11—15	16—20	21—70
<i>W_{0–50}</i> мм	0—15	16—25	26—35	36—45	46—140
<i>W_{0–100}</i> мм	0—25	26—40	41—60	61—80	81—280

— на основании максимального значения средней меры близости по каждому пункту определяется категория (класс) засухи;

— составляются сводные таблицы распределения разных категорий засух по пунктам наблюдений в рамках субъектов РФ или других территориально-административных образований;

— при необходимости составляются карто-схемы с выделением зон с засухами различной интенсивности.

Оценка развития засух осуществляется в автоматизированном режиме.

Подготовка и выпуск декадного бюллетеня засушливых явлений осуществляется с использованием данных из декадных агрометеорологических телеграмм.

Декадный бюллетень засушливых явлений содержит:

— показатели и критерии мониторинга засух различной интенсивности;

— карто-схемы распределения сильных засух по субъектам РФ;

— краткий обзор особенностей распределения засух разной интенсивности по территории РФ;

— ежедекадный мониторинг засух различной интенсивности за период май — сентябрь j -го года по территории РФ.

Для примера приведем карто-схему распределения засух по территории Саратовской области (рис. 3) за третью декаду мая 2011 г.

Фонд агроклиматических характеристик (ФАХ) засушливых явлений и засух представляет собой базу данных на технических носителях для информационного обеспечения реализации основных задач Центра мониторинга засух (ЦМЗ) Межгосударственного совета по гидрометеорологии (МСГ) СНГ и программные средства по его формированию и управлению. Он создается в соответствии с Положением о ЦМЗ МСГ СНГ.

База данных содержит ежегодные значения характеристик и показателей оценки засух и засушливых явлений на текущий год по отдельным пунктам за период апрель — октябрь, а также вероятностные оценки динамики засушливых явлений разной интенсивности. Накопленные материалы при запросе потребителей могут выдаваться в форме таблиц (табл. 2) или карто-схем (рис. 4).

Например, авторами составлена уникальная карто-схема «Риск сильных почвенных засух в период сева и вегетации озимых зерновых культур на европейской территории России» (см. рис. 4). Эта впервые публикуемая карта отражает развитие процесса в период с 1992 по 2010 г.

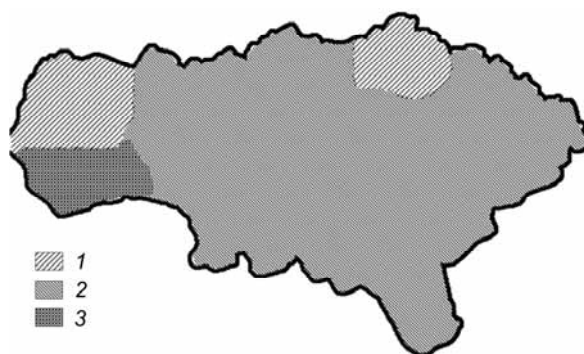


Рис. 3. Распределение интенсивности засух за третью декаду мая 2011 г. по территории Саратовской области.
1 — сильная засуха, 2 — средняя засуха, 3 — отсутствие засухи.

Таблица 2

**Вероятность (%) почвенных засух разной интенсивности в слое почвы
0—20 см под озимыми зерновыми культурами к началу сева и
массового наступления фаз развития в Ростовской области**

Станция	На дату посева		На дату выхода в трубку		На дату молочной спелости	
	Сильная засуха	Средняя засуха	Сильная засуха	Средняя засуха	Сильная засуха	Средняя засуха
34344 Казанская	17	42	18	27	83	17
34432 Чертково	39	50	0	11	33	39
34438 Миллерово	25	25	0	40	33	17
34445 Боковская	42	17	9	18	73	18
34539 Белая Калитва	33	0	33	67	67	33
34545 Морозовск	28	22	0	6	50	17
34625 Матвеев- Курган	39	22	0	11	44	39
34635 Шахты	25	33	0	0	30	30
34636 Семикаракорск	27	9	0	17	58	17
34644 Константи- новск	33	25	8	25	67	25
34646 Цимлянск	14	29	13	6	67	13
34740 Гигант	27	27	0	0	46	8
34742 Мартыновка	38	0	13	25	63	13
34743 Зимовники	17	28	0	24	69	6
34759 Ремонтное	29	35	0	17	83	17
34723 Азов	18	9	0	0	20	40
34735 зерноград	17	33	0	14	50	50
34747 Целина	0	100	0	0	0	0
34554 Обливская	0	33	0	0	100	0
34748 Пролетарская	0	33	0	0	100	0

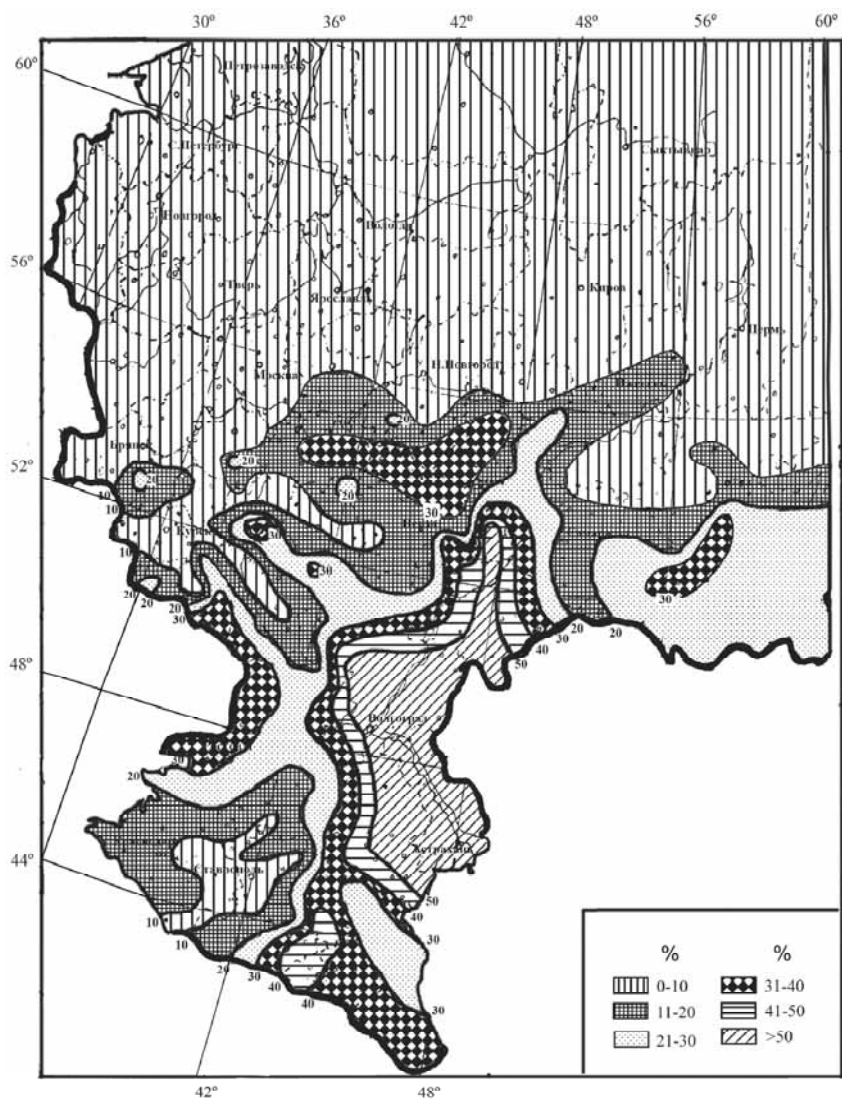


Рис. 4. Вероятность (%) сильных почвенных засух в слое почвы 0—20 см в период сева и вегетации озимых зерновых культур на европейской части России.

Заключение

Изложенные в настоящей работе методы агроклиматического и оперативного мониторинга засушливых явлений не исчерпывают многообразие подходов, которые используются в России и во всем мире для этой цели. Основная задача авторов заключалась в том, чтобы показать методику мониторинга засушливых явлений, используемую во ВНИИСХМ (Центр мониторинга засух МСГ СНГ).

Используемые в ЦМЗ МСГ СНГ методы мониторинга засушливых явлений и засух разработаны в разное время. Наиболее новая из них — использование фонда агроклиматических характеристик засушливых явлений и засух. Материалы фонда позволяют выстроить, например, динамику вероятности засух разной интенсивности на различные даты, построить карты риска засух разной интенсивности. Приведенные в настоящей работе в качестве примера таблица «Вероятность (%) почвенных засух разной интенсивности в слое почвы 0—20 см под озимыми зерновыми культурами к началу сева и массового наступления фаз развития в Ростовской области» и карта «Вероятность (%) сильных почвенных засух в слое почвы 0—20 см в период сева и вегетации озимых зерновых культур на европейской части России» показывают, что такого рода материал позволяет выполнить различные обобщения и выработать рекомендации по снижению отрицательного эффекта засушливых явлений на рост и развитие сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации (2005) / Под ред. С. К. Шойгу. — М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», с. 205—229.

Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации. Агроклиматические опасности и риски. Южный федеральный округ (2007) / Под ред. С. К. Шойгу. — М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», с. 270—291.

Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации. Агроклиматические опасности и риски. Приволжский федеральный округ (2008) / Под ред. С. К. Шойгу. — М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», с. 196—211.

Вавилов Н. И. Мировые ресурсы засухоустойчивых сортов / Доклады Всесоюзной конференции по борьбе с засухой. Бюлл. № 2. — М., 1931, с. 18—28.

Жуков В. А., Полевой А. Н., Витченко А. Н., Даниелов С. А. (1989). Математические методы оценки агроклиматических ресурсов. — Л.: Гидрометеоиздат. 207 с.

Зойдзе Е. К. (2004). Об одном подходе к исследованию неблагоприятных агроклиматических явлений в условиях изменения климата в Российской Федерации // Метеорология и гидрология. № 1. С. 96—105.

Зойдзе Е. К., Сухарева В. В. (1991). Методические указания по составлению «Научно-прикладных справочников по агроклиматическим ресурсам». Сер. 2. Ч. 4. Засушливые явления СССР. — Обнинск: изд-во ВНИИСХМ. 49 с.

Зойдзе Е. К., Хомякова Т. В. (2000). Оценка засушливых явлений в Российской Федерации // Труды ВНИИСХМ. Вып. 33. С. 118—133.

Зойдзе Е. К., Хомякова Т. В. (2002). Основы оперативной системы оценки развития засух и опыт ее экспериментальной эксплуатации // Труды ВНИИСХМ. Вып. 34. С. 48—66.

Зойдзе Е. К. и др. (2010). О проблеме адекватного агроклиматического обеспечения экономики Российской Федерации в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. № 8. С. 73—86.

УДК 551.577.38: 632.112(470):551.533.2

**АНАЛИЗ ОПАСНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЗАСУХ
1972 И 2010 ГГ. И МАКРОЦИРКУЛЯЦИОННЫХ УСЛОВИЙ
ИХ ФОРМИРОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ
ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

Е. А. Черенкова, Н. К. Кононова

Институт географии Российской академии наук
119017 Москва, Старомонетный переулок, 29
E-mail: lcherenkova@marketresearch.ru, NinaKononova@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.01.2012
Поступила после доработки 6.03.2012

Летом 2010 г. над центром европейской части России и Поволжьем установился блокирующий антициклон, под влиянием которого здесь наблюдалась жаркая сухая погода. Во многих городах был превышен абсолютный температурный максимум за всю историю наблюдений. Вследствие аномально жаркой погоды увеличилась пожароопасность, участились случаи обращения населения в экстренные медицинские службы. Сильная жара вызвала угнетение и частичное увядание растений (Бережная и др., 2010б; Бережная и др., 2010в).

Со второй декады июня по первую декаду октября пожароопасность на территории южных областей европейской части России (ЕЧР) достигала опасных критериев; наибольшая продолжительность пожароопасного периода (114 дней) была зарегистрирована в Калмыкии и Астраханской области (Бюллетень, 2011). На территории Астраханской и Волгоградской областей, Ставропольского края и Калмыкии погибли посевы сельскохозяйственных культур, в ряде регионов сохранялся режим чрезвычайной ситуации (Бережная и др., 2010а).

Впоследствии на совместном заседании Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследование по теории климата Земли» веду-

щие российские ученые проанализировали аномальные погодные условия на территории России летом 2010 г. с различных точек зрения (Володин, 2011; Иванов, 2011; Иванова и др., 2011; Кузнецова и др., 2011; Мелешко и др., 2011; Мохов, 2011; Фролов, Страшная, 2011; Шакина и др., 2011). Погодная аномалия лета 2010 г. на территории России нашла отклик и в зарубежных научных публикациях (Blunden et al., 2011; Grumm, 2011; Lau, Kim 2012; Schubert et al., 2011).

В условиях длительной жары в период с июня по август 2010 г. на юге европейской части России появились предпосылки для формирования катастрофического природного явления — опасной атмосферной засухи (ОАЗ), которая, согласно критерию, рекомендованному Гидрометцентром России, возникает в сезон вегетации, когда не менее 30 дней подряд при максимальной температуре воздуха выше 25 °С (в южных районах РФ выше 30 °С) количество осадков не превышает 5 мм в сутки (Гречиха, 2004). Допускается, что во время ОАЗ на фоне установившегося периода аномально высоких температур может быть несколько дней (в сумме не более четверти продолжительности периода засухи), когда температура воздуха составляет менее 25 °С. Временное понижение температуры, как правило, связано с выпадением осадков. На территории европейской части России такой тип засухи встречается в основном на юге и юго-востоке.

Вопросы, связанные с условиями формирования, повторяемостью и продолжительностью засушливых периодов, поднимались многими исследователями (Дроздов, 1980; Золотокрылин и др., 2007; Логинов, 2002; Мещерская, 1988; Раунер, 1981; Уланова, Страшная, 2000). Была изучена их связь с циркуляцией атмосферы (Глух, 1960; Кувшинова, 1960; Курганская, 1953; Хмелевская, 1979).

Ранее авторами была изучена динамика и составлен каталог опасной атмосферной засухи на юге европейской части России в период 1936—2000 гг. (Черенкова, 2007), была проанализирована связь ОАЗ с макроциркуляционными процессами в XX веке (Черенкова, Кононова, 2009). Целью настоящей работы является исследование макроциркуляционных условий формирования опасных атмосферных засух и анализ их пространственно-

временных особенностей на территории европейской части России в 1972 и 2010 гг., когда такие засухи охватывали наибольшую площадь.

Материалы и методы

Исследование проводилось на основе климатического архива ВНИИГМИ—МЦД — суточных значений температуры воздуха и суточных сумм осадков по данным 44 метеостанций на территории европейской части России. Особое внимание было уделено равнинной территории юга европейской части России, представленной типично степными, сухостепными и полупустынными ландшафтами. Граница засушливых земель (северная граница сухой субгумидной зоны увлажнения) и их площадь в условиях современного климата были определены ранее в соответствии с рекомендацией Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (Золотокрылин, Черенкова, 2009).

Была проведена классификация опасных атмосферных засух по площади охвата рассмотренной территории в период с 1936 по 2010 г. Для определения площади засухи средствами ГИС была построена модель, в которой за каждый год рассчитывалась суммарная площадь многоугольников, в центре которых располагались метеостанции, на которых наблюдалась ОАЗ. При выполнении процедуры оптимального разбиения поверхности на многоугольники учитывалось принятое допущение, что зона влияния каждой метеостанции не пересекается с зонами влияния других метеостанций и определяется плотностью покрытия, а также пространственным положением метеостанций. Границы таких зон равноудалены от их центров — метеостанций. В настоящей работе проанализированы две наиболее обширные опасные атмосферные засухи, наблюдавшиеся на европейской части России (2010 и 1972 гг.).

Проведенная классификация опасных атмосферных засух достаточно хорошо согласуется с существующими каталогами засушливых лет (Каменькова, 1964; Обухов, 1949; Раунер, 1981; Утешев, 1972 и др.), а также с наиболее современными каталога-

ми, составленными А. В. Мещерской на основе применения индекса, учитывающего площадь распространения засушливых явлений в основных зерносеющих районах европейской части СНГ за период 1891—2010 гг. (Мещерская и др., 2011) и А. И. Страшной с применением гидротермического коэффициента увлажнения Г. Т. Селянинова (ГТК) за последние 60 лет (Фролов, Страшная, 2011). Наилучшее совпадение лет наблюдается в случае наиболее крупномасштабных засух. Различия в определении приоритета засушливых лет обусловлены методологическими аспектами при выявлении засух, неполным соответствием границ рассмотренных территорий. Кроме того, необходимо учитывать особенность критерия опасной атмосферной засухи, которая состоит в характеристике засушливости с точки зрения наличия в сезон вегетации длительных непрерывных бездождных периодов на фоне аномально высоких температур. Различия результатов может также быть обусловлено дихотомичностью показателя ОАЗ и его чувствительностью к региональным осадкам.

Для анализа циркуляции атмосферы использована типизация элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) Северного полушария, разработанная Б. Л. Дзердзеевским, В. М. Курганской и Э. М. Витвицкой (Дзердзеевский и др., 1946). Известна группировка ЭЦМ для шести секторов Северного полушария, проведенная Б. Л. Дзердзеевским (Дзердзеевский, 1968) по траекториям циклонов и антициклонов в каждом секторе: атлантическом, европейском, сибирском, дальневосточном, тихоокеанском и американском. Европейский сектор ограничен меридианами 0 и 60° в.д. Поскольку координаты района исследования составляют приблизительно 42—55° с. ш. и 35—60° в. д., авторы выделили для этого региона следующие группы циркуляции по генезису циклонов и антициклонов, пришедших в исследуемый регион: широтную западную (распространение гребня азорского антициклона), долготную северную (вторжение арктических антициклонов), долготную южную (выход южного циклона) и стационарное положение (стационарирование антициклона в рассматриваемом регионе). Распределение ЭЦМ по группам циркуляции представлено в табл. 1.

Таблица 1

**Распределение ЭЦМ, встречавшихся во время засух,
по группам циркуляции для юга европейской части России**

Группа ЭЦМ			
Широтная западная	Долготная северная	Долготная южная	Стационарное положение
2а, 2в, 6, 7ал, 7бл	4б, 4в, 8бл, 8гл, 8гз, 10а, 10б, 12а, 12бл, 12вл	2б, 8вл	3, 8а, 9а, 13л
Отрог азорского антициклона распространяется на регион	Арктические антициклоны распространяются на регион либо через европейскую часть России (ЭЦМ 4б, 4в, 10а, 10б), либо через западную Сибирь (ЭЦМ 8бл, 8гз, 8гл, 12а, 12бл, 12вл)	На юг европейской части России выходят средиземноморские циклоны	Над регионам устанавливается антициклоническая циркуляция

Примечания: 1. Зональные ЭЦМ для Северного полушария без блокирующих процессов с тремя выходами южных циклонов: 2а — на Центральную и Западную Европу, вдоль Тихоокеанского побережья, через Северную Америку; 2б — один из них на бассейны Волги и Урала; 2в — через Каспийское и Аральское моря на бассейн Оби и Енисея, вдоль Тихоокеанского побережья, через Северную Америку.

2. ЭЦМ нарушения зональности для Северного полушария: 3 — блокирующий антициклон над Атлантикой; 4б — блокирующий процесс на европейской части России (ЕЧР); 4в — блокирующий процесс на Урале и в Западной Сибири; 6 — блокирующий антициклон в Тихоокеанском секторе; 7ал — блокирующий процесс на востоке Северной Америки; 7бл — блокирующий процесс на западе Северной Америки.

3. Меридиональные северные ЭЦМ для Северного полушария. Два блокирующих процесса: 8а — над востоком Северной Америки и над Западной Европой; 8бл — на ЕЧР и в Восточной Сибири; 8вл — над Восточной Сибирью и Тихим океаном; 8гл — над Атлантикой и Западной Сибирью; 8гз — над Атлантикой и Восточной Сибирью; 9а — над Атлантикой и Тихим океаном; 10а — над ЕЧР и востоком Северной Америки; 10б — над востоком ЕЧР и западом Северной Америки. 12а — четыре блокирующих процесса, один из которых над ЕЧР. Три блокирующих процесса: 12бл — один из них над сектором от 40 до 100° в. д.; 12вл — один из них над бассейнами Волги и Оби.

4. Меридиональный южный ЭЦМ для полушария: 13л — четыре выхода южных циклонов.

Подробное описание с приведением динамических схем и графиков внутригодового изменения повторяемости и многолетнего хода продолжительности ЭЦМ представлено на Интернет-сайте по адресу: www.atmospheric-circulation.ru. Там же размещен Календарь последовательной смены ЭЦМ по текущий год.

Обсуждение результатов

Рассмотрим метеорологические условия в зимний и весенний сезоны, предшествующие засухе. С января по март 1972 г. на территории европейской части России преобладала отрицательная аномалия среднемесячной температуры воздуха, которая составила в среднем $-6,8$ °С в январе, $-0,5$ °С в феврале и $-1,3$ °С в марте. В те же месяцы отмечался дефицит осадков: в среднем на европейской части России в январе выпало 37 % нормы осадков, в феврале — 41 %, а в марте — 77 %. В 2010 г. зима на европейской части России выдалась холодной в течение всех трех месяцев. Среднемесячная температура воздуха здесь в среднем была ниже нормы: в декабре на $1,2$ °С, в январе на $3,6$ °С, в феврале на $0,9$ °С. Наибольшая аномалия среднемесячной температуры воздуха отмечалась в центральной части в январе и составила в среднем -5 °С.

В зимний период дефицита осадков почти не наблюдалось, а на юге и западе территории сумма осадков превысила норму почти в два раза. Весна была теплой, и в центральных областях европейской части России ощущался недостаток осадков (в апреле до 40 % нормы).

На фоне аномально холодной зимы и глубокого промерзания почвы часть выпавших зимой осадков весной 1972 и 2010 гг. ушла в сток. Недостаток осадков зимой 1972 г. и малое их количество практически во все весенние месяцы рассматриваемых лет создали предпосылки для дальнейшего развития засухливости летом.

Рассмотрим генезис атмосферных засух на территории европейской части России летом 1972 и 2010 гг. В мае 1972 г. на юге европейской части России и в Поволжье на фоне существенного дефицита осадков при повышенной температуре воздуха начала развиваться засуха (Гидрометеорологические особенности..., 1973). Во второй декаде мая в южных областях европейской части России и в Саратовской области возник очаг опасной атмосферной засухи. В это время в районах, расположенных западнее, жаркая погода сопровождалась дождями временами ливневого характера. Затем, после выпадения осадков в некоторых районах в конце июня, ОАЗ в первых числах июля при ЭЦМ 12вл (заток арктического

воздуха на юг ЕЧР через Западную Сибирь) возобновилась на юге европейской части России.

При новых вторжениях арктического воздуха (ЭЦМ 12вл и 10а), формировании устойчивого антициклона на юге ЕЧР (ЭЦМ 8а) и новом пополнении его сухим арктическим воздухом (ЭЦМ 4б, 10б, 8гл, 4в) усиление интенсивности температурной аномалии привело к распространению отрицательных экстремумов увлажнения на территорию Центрально-Черноземного, Волго-Вятского и Центрального районов и даже в северные районы Нечерноземной зоны (рис. 1).

К концу августа ОАЗ закончилась в центральных и северных областях ЕЧР, а ко второй декаде сентября прекратилась в южных

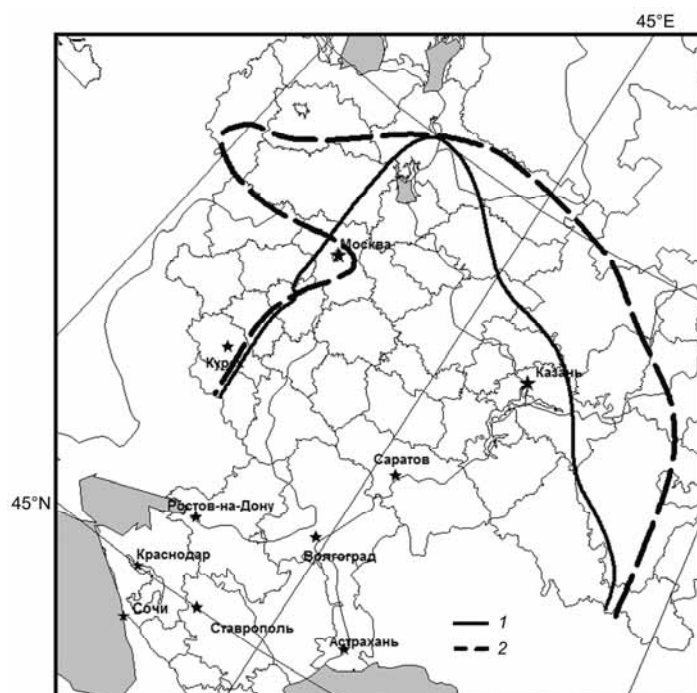


Рис. 1. Северная граница области опасной атмосферной засухи на территории европейской части России в 1972 г. (1) и в 2010 г. (2).

районах. Дольше всего ОАЗ сохранялась на юге Астраханской области (126 дней). Наименьшая длительность засухи отмечалась в Оренбургской области, где она составила 31 день (табл. 3). Из табл. 3 видно, что в формирование засухи в Астрахани наибольший вклад внесли меридиональные северные ЭЦМ для Северного полушария в целом (50 дней, 40 % продолжительности ОАЗ) и ЭЦМ группы нарушения зональности (39 дней, 31 %). В формирование опасной засухи на всей рассмотренной территории наибольший вклад внесли следующие группы ЭЦМ: нарушение зональности (в среднем 21 день, 37 % продолжительности ОАЗ) и меридиональные южные для Северного полушария (в среднем, 15 дней, 27 %).

По группам циркуляции для юга европейской части России ЭЦМ разделились следующим образом: долготные северные в среднем 26 дней (44 % продолжительности ОАЗ), стационарное положение в среднем 21 день (37 %), широтная западная (на юге ЕЧР влияние восточного отрога азорского антициклона) в среднем семь дней (13 %) и долготная южная (выход средиземноморских циклонов) в среднем менее одного дня (0,3 %). В то же время, продолжительность долготной северной группы циркуляции в период ОАЗ была в 1,5 раза больше средней за 1899—2010 гг., продолжительность существования самостоятельного стационарного антициклона на юге ЕЧР составляла 89 % средней, продолжительность влияния азорского антициклона — 63 %, а выходов южных циклонов — 48 %.

Другими словами, в 1972 г. ОАЗ развивалась в основном в сухом арктическом воздухе, поступавшем в арктических антициклонах и прогревавшемся над континентом, в результате чего формировался самостоятельный антициклон над югом ЕЧР. Азорский максимум также играл заметную роль в развитии этой ОАЗ. Заметим, что эта засуха наблюдалась в период увеличения продолжительности циклонической циркуляции в высоких широтах Северного полушария (1970—1980 гг.). Засуха с менее жесткими критериями отмечалась этим летом на всей европейской части России (Кац, 1973).

В мае 2010 г. на фоне ранней и теплой весны на ЕЧР увеличилась повторяемость бездождных периодов, однако осадков было достаточно, особенно в первую половину мая (в южных областях ЕЧР) и в последнюю декаду (в Центрально-Черноземном районе). В конце мая при ЭЦМ 3 и 9а в южной половине ЕЧР сформировался антициклон, и в начале июня при ЭЦМ 4б произошел заток туда сухого арктического воздуха. Над континентом воздух быстро прогрелся, и на территории от Приазовья до Северо-Западного Прикаспия, находившейся под влиянием сформировавшегося здесь антициклона, установилась теплая погода с температурой воздуха, превышающей 25 °С. Далее, при ЭЦМ 12а, в эту область вновь произошел заток сухого арктического воздуха. В это время очаг опасной атмосферной засухи возник на юге Астраханской области, однако к западу, северу и северо-западу от этого региона антициклоническая циркуляция не была устойчивой из-за прорыва средиземноморских циклонов при ЭЦМ 12а и прохождения атлантических циклонов при ЭЦМ 9а. Здесь в это время погода была нежаркой и дождливой.

Только после вторжений арктического воздуха во вторую декаду июня при ЭЦМ 12а над всей восточной половиной ЕЧР установилась устойчивая антициклоническая погода, и опасная атмосферная засуха охватила не только южные области, но и территорию Центрально-Черноземного района, Поволжье и Южное Предуралье (см. рис. 1).

Далее, при ЭЦМ 13л, в конце июня — начале июля произошло дальнейшее усиление антициклона и увеличение площади стационарного антициклона на юге ЕЧР, в результате чего ОАЗ распространилась на большую территорию. Засуха проявилась на территории Центрального района, а затем в течение первых 12 дней июля ОАЗ распространилась также на Псковскую, Вологодскую и Кировскую области. Засуха на несколько дней прервалась небольшими осадками, выпавшими в начале июля на фронтах, связанных с циклонами, проходившими севернее рассматриваемого региона. На метеостанции Приморско-Ахтарск опасная засуха и вовсе прекратилась. На метеостанции Саратов засуха перешла в разряд опасной только 29 июля.

Опасная атмосферная засуха в более северных районах европейской части России закончилась в первую декаду августа, а в центральных районах отмечалась дольше на 10—15 дней. В южных областях засуха продолжалась до начала сентября. На юге Астраханской области продолжительность ОАЗ была максимальной (129 дней), и она продолжалась до конца сентября. Продолжительность ОАЗ на территории Краснодарского края была наименьшей (30 дней).

Аномалия среднемесячной температуры приземного воздуха в июне—августе 2010 г., как и в аналогичный период 1972 г., имела положительный знак, но была более выраженной (табл. 2). Из табл. 3 видно, что опасная атмосферная засуха на метеостанциях

Таблица 2

Средние месячные аномалии температуры воздуха и сумм осадков по сравнению с периодом 1961—1990 гг.

Метеостанция	Температура, °С						Сумма осадков, %					
	1972 г.			2010 г.			1972 г.			2010 г.		
	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII
Астрахань	2,4	1,5	1,8	3,4	3,9	4,0	31	0	0	24	0	5
Элиста	3,5	3,1	3,9	3,3	4,5	5,3	33	127	11	19	166	7
Приморско-Ахтарск	3,0	1,2	2,6	2,7	3,0	4,7	31	409	29	82	52	55
Ростов-на-Дону	4,9	4,7	5,9	4,5	5,8	7,7	41	148	148	17	132	9
Цимлянск	3,3	2,8	4,2	3,6	4,1	5,4	82	36	8	100	104	10
Александров-Гай	2,1	3,0	4,5	4,9	5,6	5,9	100	41	0	0	33	26
Октябрьский Городок	2,9	4,1	6,3	4,7	6,4	6,3	40	9	1	1	33	20
Воронеж	3,8	3,9	6,6	4,2	6,8	7,1	92	52	7	52	46	52
Каменная Степь	3,9	3,5	6,6	5,0	7,0	7,3	76	125	13	4	35	55
Самара	0,4	2,2	5,3	4,9	6,6	6,8	67	62	0	9	2	51
Тамбов	3,7	4,3	6,9	4,0	7,3	6,5	5	28	0	48	15	100
Махачкала	1,6	0,8	0,7	2,4	2,4	2,8	147	16	4	27	15	7

Таблица 3

**Характеристики циркуляционных процессов при возникновении опасной атмосферной засухи в
1972 и 2010 гг.**

Метеостанция	Максимальная суточная температура в период ОАЗ, °С		Длительность, число дней	Дата начала ОАЗ	Группа ЭЦМ							
	Сред.	Макс.			з	нз	мс	мю	шз	дс	дю	сп
Астрахань	31,3	39,6	126	10.05.1972	6	31	40	16	10	53	3	26
	32,7	40,9	129	25.05.2010	0	9	61	29	5	42	1	53
Приморско-Ахтарск	31,6	36,6	33	11.07.1972	6	27	21	39	12	30	0	52
	29,3	35	30	26.05.2010	0	7	73	20	0	47	0	53
Элиста	31,9	37,5	101	09.07.1972	8	31	36	20	13	50	2	29
	34	41,3	96	31.05.2010	0	11	57	31	6	42	1	51
Воронеж	31,4	37,5	53	09.07.1972	11	40	13	30	15	38	0	42
	34,8	40,5	45	13.07.2010	0	11	58	31	4	38	2	56
Каменная Степь	31,2	36,5	49	14.07.1972	12	35	14	33	16	33	0	45
	32,5	40,2	87	30.05.2010	0	13	51	37	7	36	1	56
Октябрьский	31,8	37,5	80	15.06.1972	8	38	30	20	10	51	0	34
	32,8	39,2	78	01.06.2010	0	13	49	41	8	37	1	54
Саратов	32	37,8	82	14.06.1972	7	37	32	20	10	52	0	33
	34	40,9	38	29.07.2010	0	8	66	26	0	42	0	56
Александров-Гай	33,8	39,4	63	03.07.1972	10	43	17	25	13	48	0	35
	34,8	41,8	99	23.05.2010	0	14	54	32	6	35	1	58

Продолжение табл. 2

Метеостанция	Максимальная суточная температура в период ОАЭ, °С		Длительность, число дней	Дата начала ОАЭ	Группа ЭЦМ									
	Сред.	Макс.			з	нз	мс	мю	шз	дс	дю	сп		
Цимлянск	31,2 33,4	36,5 38,7	67 62	03.07.1972 08.07.2010	9 0	40 8	22 60	24 32	12 3	51 40	0 2	33 55		
Ростов-на-Дону	31,4 33,7	37 40,1	76 62	16.05.1972 08.07.2010	5 0	26 8	45 60	17 32	12 3	47 40	3 2	32 55		
Вологда	28,2 30,5	35,5 36,4	34 41	25.07.1972 02.07.2010	12 0	35 12	21 34	24 54	18 5	38 29	0 2	35 63		
Киров	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Кострома	31,8 29,2 31,6	36,6 36,3 37,1	34 55 52	11.07.2010 03.07.1972 21.06.2010	0 7 9	15 42 17	44 16 29	41 29 54	6 11 12	35 47 25	3 0 2	56 36 62		
Нижний Новгород	28,8 32	35,1 38,2	58 59	03.07.1972 21.06.2010	10 0	41 15	16 36	28 49	14 10	45 29	0 2	36 59		
Казань	29,2 33,4	35,6 39	29 40	01.07.1972 10.07.2010	7 0	52 13	14 48	28 40	14 5	59 38	0 3	28 55		
Москва	28,8	34,8	38	06.07.1972	5	37	18	34	11	39	0	45		
Елатьма	— 29,9 32,9	— 35,2 39,3	— 56 60	— 05.07.1972 21.06.2010	— 11 0	— 43 15	— 13 37	— 29 48	— 14 10	— 43 28	— 0 2	— 38 60		

Павелец	30,4	35,7	52	06.07.1972	8	42	13	31	12	44	0	38
	35,5	39,4	32	19.07.2010	0	16	53	31	6	38	3	53
Тамбов	30,9	37	45	17.07.1972	13	31	16	33	18	29	0	47
	33,6	41,1	76	06.06.2010	0	12	46	42	8	32	1	59
Великие Луки	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	29,2	34,8	35	28.06.2010	0	9	29	63	9	20	3	69
Ижевск	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	31,3	37	38	12.07.2010	0	13	50	37	5	39	3	53
Красноуфимск	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	29,2	35,4	51	22.06.2010	0	18	27	55	12	24	2	63
Самара	29,5	34,5	62	04.07.1972	10	44	16	26	13	47	0	35
	32,2	39,9	82	31.05.2010	0	13	48	39	7	37	1	55
Оренбург	30,8	35,9	31	03.08.1972	13	39	16	26	13	45	0	35
	32,8	37,9	48	01.06.2010	0	10	44	46	8	35	0	56
Уфа	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	30,2	37,7	76	01.06.2010	0	13	46	41	8	34	1	57

Примечания. 1. з — зональная, нз — нарушение зональности, мс — меридиональная северная, мю — меридиональная южная (для Северного полушария), шз — широтная западная, дс — долготная северная, дю — долготная южная, сп — стационарное положение (для юга ЕНР).

2. Продолжительность групп ЭЦМ для каждой метеостанции указана в долях (%) общей продолжительности ОАВ.

Таблица 4

Характеристики ЭЦМ в период ОАЗ летом 1972 и 2010 гг. (число дней): продолжительность (I), ее среднее многолетнее значение за 1899—2010 гг. (II) и аномалия (III)

Характеристика	ЭЦМ															
	2а	3	4б	4в	6	7ал	8а	8вл	8гл	9а	10а	10б	12а	12бл	12вл	13л
	<i>Июнь 1972 г.</i>															
I		3					5				2				5	
II		1,99					1,3				1,39				0,95	
III		1,01					3,7				0,61				4,05	
	<i>Июль 1972 г.</i>															
I	2		5	8	2				2	1		2				8
II	1,17		2,9	2,0	0,7				0,98	2,24		2,2				5,54
III	0,83		2,1	5,9	0,2				1,02	-1,2		-0,2				2,46
	<i>Август 1972 г.</i>															
I	4	2	1	8						3		3				8
II	0,81	1,84	2,1	1,9						1,38		1,92				5,54
III	3,19	0,16	-1,1	6,1						1,62		1,08				2,46
	<i>Июнь 2010 г.</i>															
I					2	2				5			12			8
II					1,4	1,55				2,26			1,52			4,85
III					0,6	0,45				2,74			10,48			3,15

		<i>Июль 2010 г.</i>						
		1	2	3	4	5	6	7
I								
II		0,35	1,1					
III		0,65	0,9					
		<i>Август 2010 г.</i>						
		1	2	3	4	5	6	7
I								
II			1,89					
III			1,11					

Каменная Степь, Тамбов, Александров-Гай летом 2010 г. была продолжительнее засухи 1972 г. более чем на месяц. В Самаре и Оренбурге длительность ОАЗ в 2010 г. была почти на три недели больше. Вместе с тем, в Саратове в летний сезон 2010 г. опасная атмосферная засуха была короче на 44 дня, в Ростове-на-Дону — на две недели, а на метеостанции Павелец — на три недели по сравнению с аналогичным периодом 1972 г. На остальных рассмотренных метеостанциях изменения продолжительности засухи не были столь существенными.

Средняя максимальная температура воздуха в период засухи 2010 г., которая составила 29,2—35,5 °С, превысила максимальные наблюдаемые в период прежних засух значения. Среднее и максимум максимальной суточной температуры в период опасной атмосферной засухи были выше в 2010 г. по сравнению с 1972 г. Наибольшее различие максимумов температуры зафиксировано в Самаре (5,4 °С), средние температуры более всего различались на метеостанции Павелец (5,1 °С).

В большинстве рассмотренных случаев ОАЗ в 2010 г. начиналась раньше. С опережением более чем на месяц по сравнению с засухой 1972 г. ОАЗ в 2010 г. сформировалась на метеостанциях Каменная Степь, Александров-Гай и Тамбов. По площади охвата территории юга России в летний сезон засухе 2010 г. не было аналогов с 1936 г. Очаг ОАЗ охватил не только области, которые в прошлом неоднократно подвергались подобной засухе, но и более северо-западные (Псковская область) и северо-восточные районы (Предуралье), где ОАЗ ранее никогда не наблюдалась. Засуха с менее жесткими условиями наблюдалась этим летом и в более северных районах ЕЧР (Мещерская и др., 2011; Фролов, Страшная, 2011).

Необходимо отметить, что по данным метеостанций Павелец, Казань, Киров, Ижевск, Оренбург продолжительность жары не превысила 40 дней, а в Предуралье и Зауралье в это время было прохладно и шли дожди. Это происходило в связи с тем, что сформировавшийся 11—12 июня при ЭЦМ 13л устойчивый антициклон над центром, югом и юго-востоком ЕЧР не позволял средиземномор-

ским циклонам пройти обычным путем на ЕЧР. В результате они огибали область высокого давления с юга и выходили на Предуралье, Зауралье и Западную Сибирь. Атлантические циклоны, прошедшие по северу ЕЧР, огибали эту область с севера и также приносили осадки и понижение температуры в указанные районы.

Опасная атмосферная засуха 2010 г. состоялась в период уменьшения продолжительности выходов южных циклонов и усиления меридиональных северных (блокирующих) процессов (рис. 2). В формирование опасной засухи на всей рассмотренной территории наибольший вклад внесли группы ЭЦМ: стационарное положение (в среднем 34 дня, 57 % общей продолжительности ОАЗ) и меридиональные северные для Северного полушария (в среднем 30 дней, 48 % общей длительности засухи) (см. табл. 3).

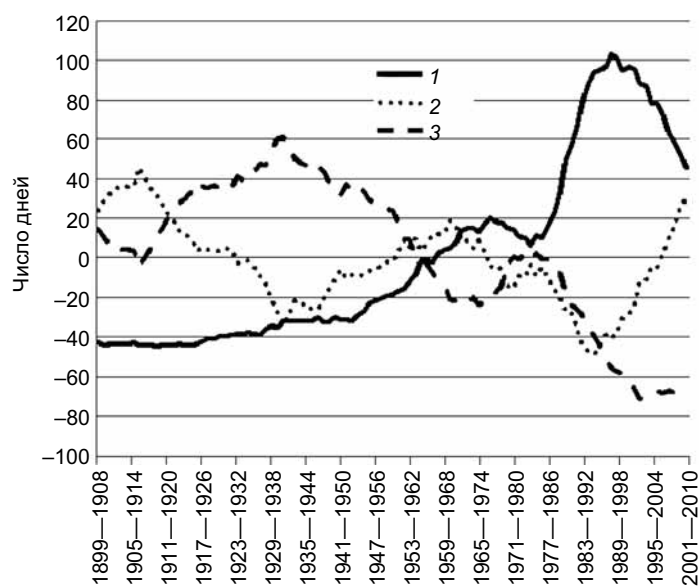


Рис. 2. Отклонения продолжительности групп ЭЦМ (10-летние скользящие средние) в период 1899—2010 гг.

1 — меридиональная южная, 2 — меридиональная северная, 3 — зональная и нарушение зональности.

В период развития ОАЗ (май—сентябрь) на юге ЕЧР наиболее продолжительным было стационарирование самостоятельного антициклона (превысило норму за 1899—2010 гг. на 43 %), который пополнялся за счет арктических вторжений на ЕЧР (на 20 % выше нормы) и распространения отрога азорского антициклона на юг ЕЧР (его длительность составила 25 % нормы). На выходы южных циклонов, которые прерывали течение ОАЗ, приходилось 11 % средней продолжительности этой группы в мае—сентябре в сравнении со средним за период 1899—2010 гг.

Поскольку возрастающая в последние годы продолжительность блокирующих процессов еще не достигла того уровня, который отмечался в конце 60-х — начале 70-х годов, формирование ОАЗ в рассмотренных районах в ближайшем будущем весьма вероятно.

Выводы

Аномально холодная зима, а также дефицит осадков на территории европейской части России зимой и почти во все весенние месяцы 1972 г. создали предпосылки для дальнейшего развития засушливости летом. Холодная зима 2010 г., не способствующая пополнению влагозапасов за счет снеготаяния, оказала влияние на формирование засушливых условий в мае в центре европейской части России.

Опасные атмосферные засухи 1972 и 2010 гг. приходятся на период повышенной суммарной годовой продолжительности меридиональной циркуляции в Северном полушарии: больше средней (за период 1899—2010 гг.) была также продолжительность блокирующих процессов и выходов южных циклонов. В оба летних сезона преобладали вторжения сухого арктического воздуха, быстро прогревавшегося над разогретой под безоблачным небом почвой и поддерживающего формирование стационарных антициклонов над югом, юго-востоком и центром ЕЧР. И в том, и в другом случае очаг ОАЗ сформировался в мае на территории Аст-

раханской области, где засуха закончилась лишь в сентябре. Обе катастрофические засухи можно причислить к разряду наиболее интенсивных за период с 1936 г.

Однако необходимо отметить, что ОАЗ 2010 г. превосходит ОАЗ 1972 г. по интенсивности и охвату территории. Наблюдавшаяся на юге европейской части России на фоне дефицита осадков с июня по август температурная аномалия была ярче выражена в 2010 г., нежели в 1972 г.

Различие между рассматриваемыми засухами состоит в том, что летом 1972 г. продолжительность обобщенной зональной группы циркуляции (зональная и нарушение зональности) практически не отличалась от средней за 1899—2010 гг. и составляла 40 дней за лето, а в 2010 г. она составляла всего пять дней. В связи с этим в 1972 г. существенную (а в некоторых случаях и ведущую) роль в формировании ОАЗ играла группа нарушения зональности. При ЭЦМ 4б и 4в, относящихся к этой группе, над ЕЧР формировались блокирующие процессы. Для юга ЕЧР они были долготными северными. При остальных летних ЭЦМ этой группы над высокими и средними широтами ЕЧР проходили атлантические циклоны, препятствующие распространению ОАЗ к северу.

В 2010 г. ведущая роль в формировании ОАЗ принадлежала меридиональной северной группе циркуляции, немного отставала от нее меридиональная южная. Для юга ЕЧР первая группа создает долготную северную циркуляцию, при которой образуется меридионально расположенная полоса повышенного давления, соединяющая арктический антициклон с устойчивым антициклоном, сформировавшимся на юге ЕЧР. Вторая группа способствует формированию на юге ЕЧР стационарного положения — устойчивого антициклона, который поддерживается поступающим с севера сухим арктическим воздухом, быстро прогревающимся над континентом. Эта группа оказалась доминирующей при формировании ОАЗ 2010 г.

Преобладание меридиональных процессов в циркуляции атмосферы Северного полушария, отмечающееся в последние годы, в дальнейшем может привести к формированию блокирующих ан-

тициклонов над ЕЧР (в особенности, летом) и увеличению повторяемости катастрофических засух, а также их распространению на территорию основных зернопроизводящих областей России.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 13 «Географические основы устойчивого развития Российской Федерации и ее регионов», Проект «Опустынивание засушливых земель юга России в контексте изменений климата», и финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00573).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бережная Т. В., Голубев А. Д., Найшуллер М. Г. (2010а). Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в августе 2010 г. // Метеорология и гидрология. № 11. С. 104—114.

Бережная Т. В., Голубев А. Д., Найшуллер М. Г. (2010б). Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июле 2010 г. // Метеорология и гидрология. № 10. С. 107—118.

Бережная Т. В., Голубев А. Д., Найшуллер М. Г. (2010в). Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июне 2010 г. // Метеорология и гидрология. № 9. С. 105—120.

Бюллетень Северо-Кавказского гидрометеорологического центра (2011). Северо-Кавказское межрегиональное территориальное управление Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. — Ростов-на-Дону. № 08/178.

Володин Е. М. (2011). О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры / Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». — М.: Триада ЛТД, с. 48—57.

Гидрометеорологические особенности 1972 года (1973). — М.: Гидрометеиздат. 32 с.

Глух И. С. (1960). Циркуляционные условия, подготавливающие развитие засушливых и влажных вегетационных периодов. Гидроклиматический режим лесостепной и степной зон СССР в засушливые и влажные годы. — М.: Изд-во АН СССР, с. 102—111.

Гречиха А. П. (2004). Определение опасных гидрометеорологических явлений. Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций / Доклады и выступления на III научно-практической конференции. 22—23 октября 2003 г.— М.: Едиториал УРСС, с. 19—29.

Дзердзеевский Б. Л. (1968). Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии / Материалы метеорологических исследований. — М.: Изд-во АН СССР и Межвед. геофиз. комитета при Президиуме АН СССР. 240 с.

Дзердзеевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. (1946). Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Труды науч.-исслед. учреждений ГУГМС при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. — М., Л.: Гидрометиздат. 80 с.

Дроздов О. А. (1980). Засухи и динамика увлажнения. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. 93 с.

Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А. (2009). Площадь засушливых земель равнин России // Аридные экосистемы. Т. 15, № 1(37). С. 5—12.

Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В., Черенкова Е. А. (2007). Динамика засух в Европейской России в ситуации глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 21. С. 160—181.

Иванов А. Л. (2011). Изменение климата и некоторые тенденции эволюции почвообразовательного процесса / Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». — М.: Триада ЛТД, с. 32—34.

Иванова А. Р., Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н., Богаевская Н. И. (2011). Сравнение динамических характеристик блокирующего антициклона лета 2010 года с более ранними эпизодами // Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». — М.: Триада ЛТД, с. 65—71.

Каменькова Н. И. (1964). К вопросу об изучении весенне-летних засух на Европейской территории СССР // Труды ГГО. Вып. 164. С. 43—54.

Кац А. Л. (1973). Необычное лето 1972 года. — Л.: Гидрометеиздат. 60 с.

Кувшинова К. В. (1960). Типы атмосферных процессов и связанные с ними осадки, выпадающие в вегетационные периоды засушливых и влажных лет // Гидроклиматический режим лесостепной и степной зон СССР в засушливые и влажные годы. — М., с. 112—128.

Кузнецова И. Н., Звягинцев А. М., Семутникова Е. Г. (2011). Экологические последствия погодных аномалий летом 2010 года // Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». — М.: Триада ЛТД, с. 58—64.

Курганская В. М. (1953). Характеристика засушливых периодов с точки зрения общей циркуляции атмосферы // Изв. АН СССР. Сер. геогр. № 2. С. 19—28.

Логинов В. Ф. (2002). Засухи, их возможные причины и предпосылки предсказания // Стихийные природные процессы: географические, экологические и социально-экономические аспекты. — М.: Изд-во НИЭНАС, с. 107—124.

Мелешко В. П., Мирвис В. М., Матюгин В. А., Львова Т. Ю., Булгаков К. Ю., Геворкян А. М. (2011). О воспроизведении аномалии лета 2010 года в долгосрочных метеорологических прогнозах на основе модели общей циркуляции атмосферы ГГО / Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». — М.: Триада ЛТД, с. 35—40.

Мещерская А. В. (1988). О показателе засухи и урожайности зерновых культур // Метеорология и гидрология. № 2. С. 91—98.

Мещерская А. В., Мирвис В. М., Голод М. П. (2011). Засуха 2010 г. на фоне многолетнего изменения засушливости в основных зерносеющих районах европейской части России // Труды ГГО. Вып. 563. С. 94—121.

Мохов И. И. (2011). Аномальное лето 2010 года в контексте общих изменений климата и его аномалий / Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». — М.: Триада ЛТД, с. 41—47.

Обухов В. М. (1949). Урожайность и метеорологические факторы. — М.: Госпланиздат, с. 9—41.

Раунер Ю. Л. (1981). Климат и урожайность зерновых культур. — М.: Наука, 164 с.

Уланова Е. С., Страшная А. И. (2000). Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур // Труды ВНИИСХМ. Вып. 33. С. 64—83.

Утешев А. С. (1972). Атмосферные засухи и их влияние на природные явления. — Алма-Ата: Наука, 195 с.

Фролов А. В., Страшная А. И. (2011). О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур / Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». — М.: Триада ЛТД, с. 22—31.

Хмелевская Л. В. (1979). Макроциркуляционные процессы в засушливые годы на юге Европейской территории СССР. Колебания климата в XX столетии / Матер. метеор. иссл. № 1. — М.: Изд-во Межвед. геофиз. комитета при Президиуме АН СССР, Ин-т географии. С. 36—44.

Черенкова Е. А. (2007). Динамика опасной атмосферной засухи в Европейской России // *Метеорология и гидрология*. № 11. С. 30—41.

Черенкова Е. А., Кононова Н. К. (2009). Связь опасных атмосферных засух в Европейской России в XX веке с макроциркуляционными процессами // *Изв. РАН. Сер. геогр.* № 1. С. 73—82.

Шакина Н. П., Иванова А. Р., Бирман Б. А., Скриптунова Е. Н. (2011). Блокирование: условия лета 2010 года в контексте современных знаний / Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». — М.: Триада ЛТД, с. 6—21.

Blunden J., Arndt D. S., Baringer M. O. (2011). State of the climate in 2010 // *Bull. Amer. Met. Soc.* V. 92. Is. 6. P. S1—S236.

Grumm Richard H. (2011). The Central European and Russian heat event of July—August 2010 // *Bull. Amer. Met. Soc.* V. 92. Is. 10. P. 1285—1296.

Lau William K. M., Kim Kyu-Myong (2012). The 2010 Pakistan Flood and Russian heat wave: teleconnection of hydrometeorological extremes // *J. Hydromet.* V. 13. Is. 1. P. 392—403.

Schubert S., Wang H., Suarez M. (2011). Warm season subseasonal variability and climate extremes in the Northern Hemisphere: the role of stationary Rossby waves // *J. Climate*. V. 24. Is. 18. P. 4773—4792.

УДК 551.521.31

ТЕНДЕНЦИИ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ЕВРОПЕ

Е. А. Самукова

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

Поступила в редакцию 13.02.2012
Поступила после доработки 4.04.2012

Введение

Энергия, излучаемая Солнцем, является главным источником существования жизни на Земле и в значительной степени обуславливает разнообразные процессы, протекающие в атмосфере.

Поступающая на земную поверхность солнечная радиация изменяется с течением времени. По данным, полученным на нескольких европейских актинометрических станциях, с начала 30-х до конца 50-х годов прошлого столетия отмечалось увеличение коротковолновой солнечной радиации (Ohmura, 2009). С конца 50-х до конца 80-х годов по данным станций интенсивно развивающейся в то время мировой актинометрической сети, происходило постепенное уменьшение суммарной радиации (Gilgen et al., 1998, 2009). На европейской территории Советского Союза уменьшение суммарной радиации в период 1960—1987 гг. составило в среднем 2—4 % за десятилетие, достигая на некоторых станциях 6—7 % (Житарчук и др., 1994; Abakumova et al., 1996; Абакумова, 2000). В Балтийском регионе приход солнечной радиации уменьшался на 3—6 % за десять лет (Russak, 1990; Руссак, 1994; Erne et al., 2009), в Германии — в среднем на 4 % (Lierpert, Kukla, 1997), в Северной Европе — на 2—3 % (Grimenes, Thue-Hansen, 2006; Stjern et al., 2009).

В последующие годы во многих регионах мира произошло изменение знака тренда приходящей солнечной радиации (Abakumova et

al., 2008; Wild et al., 2009; Климат Санкт-Петербурга, 2010; Хлебникова и др., 2011; Цветков, Самукова, 2011).

Явления уменьшения и увеличения поступления солнечной радиации на земную поверхность, получившие в научной литературе названия “global dimming” и “brightening” (Wild, 2009, 2012), связаны с циркуляционными процессами, изменениями облачности и прозрачности атмосферы (Power, 2003; Norris, Wild, 2007; Махоткина, Плахина, 2011). В некоторых исследованиях временные изменения радиации связываются с влиянием урбанизации, поскольку наиболее значительные отрицательные тренды радиации выявлены в регионах с большой плотностью населения (Alpert et al., 2005; Alpert and Kushcha, 2008).

В настоящей работе представлена оценка тенденций изменения суммарной солнечной радиации по данным архива Мирового центра радиационных данных (МЦРД).

Методы оценки временной изменчивости суммарной радиации

В настоящей работе рассматриваются временные ряды средних за сезон и за год суточных сумм суммарной радиации для 69 европейских станций за период 1964—2010 гг. При расчете сезонных и годовых значений допускалось не более 15 % пропусков суточных сумм радиации. Для выявления трендов радиационные ряды аппроксимированы линейной функцией. Доверительная вероятность коэффициентов линейных трендов определялась с помощью критерия Стьюдента. По каждой станции рассчитывались абсолютные и относительные значения трендов суммарной радиации за десятилетие за два периода — с 1964 по 1989 и с 1990 по 2010 г. Разделение рядов на две части обусловлено выявленной во многих регионах тенденцией к уменьшению радиации в 60—80-е годы прошлого столетия и к ее увеличению в последующее время.

Дополнительно для трех регионов Европы — северо-западного региона (22 станции), центрального региона (23 станции) и восточного (23 станции) и южного (24 станции) региона (рис. 1) — были сформированы временные ряды региональных сезонных и годовых отклонений радиации, которые аппроксимировались полиномом второй или четвертой степени с помощью Microsoft Office Excel.

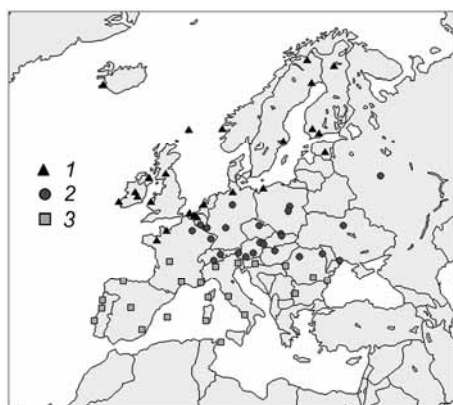


Рис. 1. Актинометрические станции Европы.
 1 — северный регион, 2 — центральный и восточный регион, 3 — южный регион.

Результаты анализа изменений суммарной радиации

Северо-западный регион Европы. Анализ годовых значений суммарной радиации, измеренной на 22 актинометрических станциях в северо-западной Европе, показывает, что в период с 1964 по 1989 г. там произошло уменьшение поступления коротковолновой солнечной радиации на земную поверхность в среднем на 2,6 % за десятилетие. Отрицательные тренды годовых значений суммарной радиации отмечаются почти на всех актинометрических станциях за исключением станций Де-Билт (Ирландия) и Леруик (Великобритания), где тренд не выявляется (табл. 1). На восьми станциях изменения радиации являются статистически значимыми, доверительная вероятность трендов превосходит 95 %. Наиболее значительное уменьшение радиации наблюдается на станции Бирр (Ирландия) — на 6,5 % (65 Дж/см^2).

Анализ сезонных значений суммарной радиации, осредненных по региону, демонстрирует сходство их временного хода. На рис. 2 представлены отклонения от средних многолетних значений суммарной радиации на рассматриваемой территории.

Наиболее существенно значения суммарной радиации понизились в летний период — в среднем на 3,8 % за 10 лет. Отрица-

Таблица 1

Относительные тренды $\Delta\beta$ (%) средних за год значений суммарной радиации
и их доверительная вероятность P (%)

Станция	Страна	Координаты		Период	1964—1989		1990—2010	
		φ° с. ш.	λ°		$\Delta\beta$ %	P %	$\Delta\beta$ %	P %
<i>Северо-западная Европа</i>								
Остенде, аэроп.	Бельгия	51°12'	2°52' в.д.	1968—2008	-3,8*	90	-0,5	23
Тарту/Тыравере	Эстония	58°15'	26°28' в.д.	1964—2010	-2,4	97	1,9	79
Соданкюля	Финляндия	67°21'	26°37' в.д.	1964—2010	-5,3	100	2,9	88
Йокойнен	Финляндия	60°48'	23°30' в.д.	1964—2010	-2,1	76	2,0	73
Хельсинки, аэроп.	Финляндия	60°19'	24°57' в.д.	1964—2010	-3,5	100	2,5	88
Кан-Карпик	Франция	49°10'	0°27' з.д.	1974—2010	-3,5	78	-0,1	10
Рен-Сен-Жак	Франция	48°04'	1°44' з.д.	1967—2010	-2,6*	82	2,8	81
Гамбург/	Германия	53°38'	10°00' в.д.	1964—2010	-2,1	88	4,5	95
Фюлсбюттель								
Рейкьявик	Исландия	64°08'	21°54' з.д.	1964—2009	-1,0	38	-2,2	67
Бирр	Ирландия	53°05'	7°54' з.д.	1971—2010	-6,5	100	3,1	91
Килкенни	Ирландия	52°40'	7°16' з.д.	1969—2009	-4,8	100	2,4	75
Валенсия, обсерв.	Ирландия	51°56'	10°15' з.д.	1964—2010	-3,5	100	5,1	100
Де-Билт	Нидерланды	52°06'	5°11' в.д.	1964—2010	0,2	13	4,1	96
Берген	Норвегия	60°24'	5°19' в.д.	1964—2010	-1,8	49	4,5	98
Колобжег	Польша	54°11'	15°35' в.д.	1964—2010	-1,1	63	-0,2	10
Кируна	Швеция	67°51'	20°25' в.д.	1969—2010	-5,7	98	0,6	22
Лулео	Швеция	65°33'	22°07' в.д.	1964—2010	-0,7	31	2,9	68
Стокгольм	Швеция	59°21'	18°04' в.д.	1964—2010	-4,2	100	4,2*	91

Продолжение табл. 1

Станция	Страна	Координаты		Период	1964—1989		1990—2010	
		φ с. ш.	λ°		Δβ %	P %	Δβ %	P %
Леруик	Великобритания	60°08'	1°11' з.д.	1964—2010	-0,1	10	3,5	92
Эскдейлмюр	Великобритания	55°19'	3°12' з.д.	1964—2010	-0,5	31	3,9	94
Белфаст/Олдергроув, аэроп.	Великобритания	54°40'	6°13' з.д.	1970—2010	-1,4	53	6,2	100
Аберпорт	Великобритания	52°08'	4°34' з.д.	1964—2010	-1,5	78	2,2	88
<i>Центральная и восточная Европа</i>								
Вена/ Хоэ-Варте	Австрия	48°15'	16°21' в.д.	1964—2010	0,3	21	0,1	10
Грац, ун-т	Австрия	47°05'	15°27' в.д.	1964—2010	—	—	5,1	100
Зонблик	Австрия	47°08'	12°57' в.д.	1964—2010	-0,8*	33	-1,3	85
Клагенфурт	Австрия	46°39'	14°20' в.д.	1964—2010	-0,7*	43	4,7	100
Мелле	Бельгия	50°59'	3°50' в.д.	1968—2008	1,0	29	6,6	92
Икль	Бельгия	50°48'	4°21' в.д.	1964—2010	-1,2	64	4,6	97
Сент-Юбер	Бельгия	50°02'	5°24' в.д.	1968—2008	-2,8*	53	7,1	97
Градец-Кралове	Чешская Республика	50°11'	15°50' в.д.	1964—2010	0,2	15	2,6	91
Реймс-Курси	Франция	49°18'	4°03' в.д.	1974—2010	-1,5	24	0,3	11
Страсбург-Энцхейм	Франция	48°32'	7°38' в.д.	1974—2010	-3,3	65	2,8	86
Брауншвейг	Германия	52°18'	10°27' в.д.	1964—2010	2,3	94	2,0	74
Вюрцбург	Германия	49°46'	9°58' в.д.	1974—2010	-2,8	100	0,2	11
Трир	Германия	49°45'	6°40' в.д.	1974—2010	-1,4	62	1,7	62
Будапешт	Венгрия	47°26'	19°11' в.д.	1964—2006	-1,2	71	5,8	91
Варшава	Польша	52°16'	20°59' в.д.	1964—2010	0,5	32	0,5	31

Бельск	Польша	51°50'	20°45' в.д.	1970—2010	-2,8	81	4,7	100
Закопане	Польша	49°18'	19°57' в.д.	1964—2010	-2,4	94	1,7	61
Москва	Россия	55°45'	37°34' в.д.	1964—2010	-3,9	100	—	—
Штрбске-Плесо	Словакия	49°07'	20°04' в.д.	1973—2008	-6,9	94	6,9*	98
Братислава-Колиба	Словакия	48°10'	17°07' в.д.	1964—2010	0,4	19	1,9*	82
Давос	Швейцария	46°49'	9°51' в.д.	1969—2010	-1,7	84	3,1	100
Локарно-Монти	Швейцария	46°10'	8°47' в.д.	1964—2010	-5,7	100	3,8	97
Киев/Борисполь	Украина	50°20'	30°58' в.д.	1964—2010	0,3*	18	1,8	27
Одесса	Украина	46°29'	30°38' в.д.	1964—2010	-2,9	100	0,9	48

Южная Европа

София, обсерв.	Болгария	42°39'	23°23' в.д.	1964—2010	-0,9	55	6,2*	71
Пунтиарка	Хорватия	45°55'	55°58' в.д.	1964—2010	-0,7	24	-0,6	16
Лимож-Бельгард	Франция	45°51'	1°10' в.д.	1967—2010	-2,2	76	0,1	10
Ницца	Франция	43°38'	7°12' в.д.	1970—2010	-3,1	98	2,0	85
Монпелье	Франция	43°34'	3°57' в.д.	1975—2010	-4,3	99	5,1	100
Аяччо	Франция	41°55'	8°47' в.д.	1970—2010	-1,7	75	1,3	94
Милан/Линате	Италия	45°28'	9°17' в.д.	1964—2010	-0,5	13	—	—
Винья-Ди-Валле	Италия	42°05'	12°13' в.д.	1964—2010	-3,0	100	—	—
Палинуро, м.	Италия	40°01'	15°17' в.д.	1964—2008	-6,9*	97	—	—
Кальяри/Эльмас	Италия	39°15'	9°04' в.д.	1972—2010	-6,1	100	—	—
Пантеллерия, о.	Италия	36°49'	11°58' в.д.	1972—2009	-4,3*	37	—	—
Порту, инст. геоф.	Португалия	41°08'	8°36' з.д.	1964—1991	-1,8	81	—	—
Коймбра, инст. геоф.	Португалия	40°12'	8°25' з.д.	1964—1991	-3,1	93	—	—
Лиссабон, инст. геоф.	Португалия	38°43'	9°09' з.д.	1964—2010	0,7	54	—	—
Яссы	Румыния	47°10'	27°36' в.д.	1964—2010	0,4	27	-2,4	78

Продолжение табл. 1

Станция	Страна	Координаты		Период	1964—1989		1990—2010	
		φ° с. ш.	λ°		Δβ %	P %	Δβ %	P %
Клуж/Напока	Румыния	46°47'	23°34' в.д.	1964—2010	0,5	34	4,7	86
Тимшоара	Румыния	45°47'	21°17' в.д.	1964—2010	-1,1	88	-1,3	38
Бухарест	Румыния	44°30'	26°13' в.д.	1964—2010	-0,5	31	1,1	52
Констанца	Румыния	44°13'	28°38' в.д.	1964—2006	1,3	67	3,8	69
Овьедо	Испания	43°21'	5°52' з.д.	1990—2010	—	—	3,9	99
Мадрид, ун-т	Испания	40°27'	3°44' з.д.	1990—2010	—	—	2,3	98
Пальма-де-Мальорка	Испания	39°33'	2°37' в.д.	1990—2010	—	—	2,4*	71
Мурсия	Испания	38°00'	1°10' з.д.	1990—2010	—	—	0,6	47

Примечание. Звездочкой обозначены станции, на которых пропуски в рядах суммарной радиации составляют 15—25 %; на остальных станциях — менее 15 %.

тельные тренды радиации диагностируются на всех станциях, причем на восьми из них коэффициенты линейной регрессии являются статистически значимыми. Максимальное уменьшение средних за летний сезон значений суммарной радиации отмечается на станциях Кируна и Стокгольм (Швеция) — около 8 % (140 и 162 Дж/см² соответственно).

В зимне-весенний сезон наблюдаются пространственные различия в тенденциях прихода радиации, регистрируемой на разных станциях. Лишь на половине станций отмечается отрицательный знак тренда средних за зимний сезон значений радиации. Наибольший статистически значимый относительный тренд выявляется на станции Валенсия, обсерватория (Ирландия), где суммарная радиация уменьшилась на 7,4 % (25 Дж/см²). На остальных станциях произошло увеличение радиации в этот сезон, однако эта тенденция не является статистически значимой.

В последующее двадцатилетие отрицательный тренд поступления солнечной радиации на земную поверхность сохраняется лишь в зоне исландского минимума (станция Рейкьявик), являясь статистически значимым в осенне-зимний период. На остальных станциях северо-запада Европы с 1990 по 2010 г. радиация возрастает в среднем на 2,6 % за 10 лет. Таким образом, в первое десятилетие XXI века произошел возврат к значениям суммарной радиации, измеренным на актинометрических станциях в 60-х годах прошлого столетия, после радиационного минимума 80-х годов.

Максимальные положительные тренды годовых значений суммарной радиации отмечаются в Великобритании и Ирландии. На станциях Белфаст/Олдергроув, аэропорт и Валенсия, обсерватория они составляют 6,2 и 5,1 % за десятилетие соответственно (53 и 46 Дж/см²) при доверительной вероятности более 95 %. В зимне-весенний сезон в этих странах также отмечаются максимальные положительные тренды радиации. На станциях Белфаст/Олдергроув, аэропорт и Валенсия, обсерватория они составляют зимой около 12 % (29 и 32 Дж/см²), на станциях Белфаст/Олдергроув, аэропорт и Эксдейлмюр весной — 8,9 и 7,9 % соответственно (79 Дж/см² на обеих станциях). Осенью

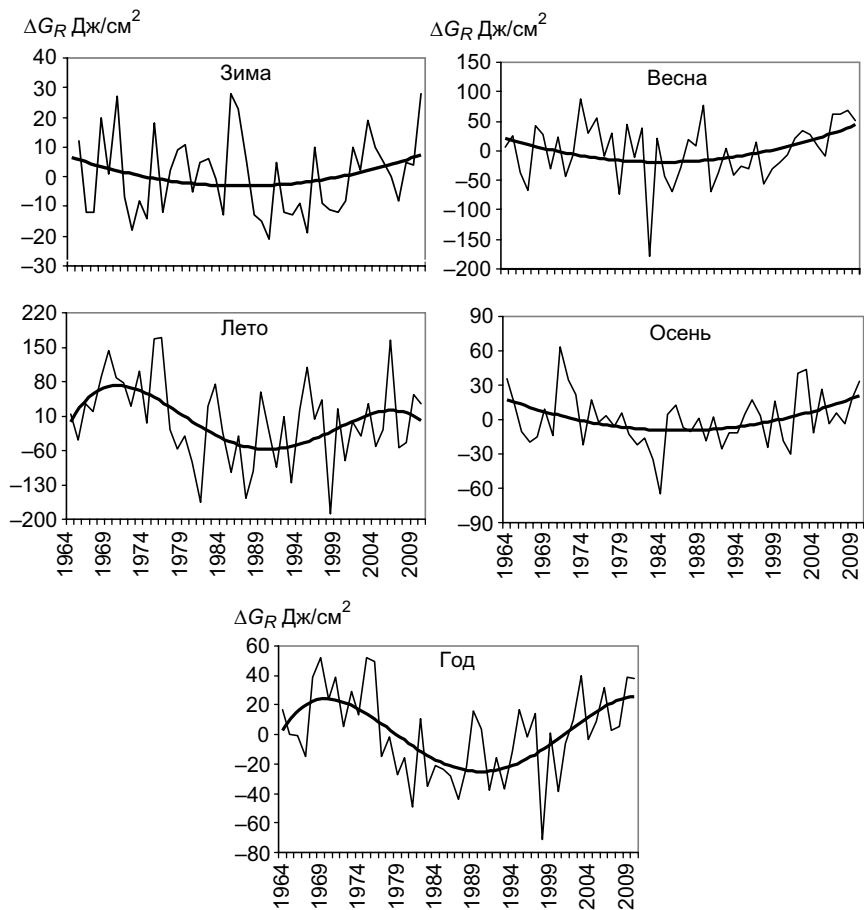


Рис. 2. Отклонения от средних за сезон и год значений суммарной радиации, осредненные по территории северо-западной Европы.

наибольшие изменения суммарной радиации наблюдались на станции Де-Билт (Нидерланды), где радиация увеличилась на 8,1 % (47 Дж/см²). Максимальный положительный тренд средних за летние месяцы значений радиации наблюдается на станции Стокгольм — 4,7 % (81 Дж/см²).

Сравнительный анализ сезонных значений суммарной радиации позволяет сделать вывод о том, что радиация на северо-западе Европы в летний, осенний и весенний периоды увеличилась в среднем на 2—3 % за десятилетие, зимой — на 5 %.

Временной ход годовых региональных значений суммарной радиации за период с 1964 по 2010 г. имеет три максимума (1969, 1975, 1976 гг.) и один минимум (1998 г.). Максимальные значения радиации отмечались в зимний период в 1970, 1985, 1986 и 2010 гг., в весенний период в 1974 и 1990 гг., в летний период в 1975, 1976 и 2006 гг., в осенний период в 1971 г. Минимальные значения наблюдались зимой в 1990 и 1995 гг., весной в 1983 г., летом в 1981 и 1998 гг., осенью в 1984 г. (рис. 2).

Центральная и восточная часть Европы. Характер изменений поступления солнечной радиации в центральной и восточной Европе за рассматриваемые периоды аналогичен тенденциям изменения этого параметра в северо-западной ее части. В период с 1964 по 1989 г. наблюдается уменьшение прихода радиации на земную поверхность, в последующие годы отмечается ее увеличение (рис. 3).

Исключение составляет зимний сезон периода 1964—1989 гг. На четырнадцати станциях в это время тренды средних за этот сезон значений радиации имеют положительный знак, причем на двух из них с доверительной вероятностью более 95 %. Наиболее существенное увеличение радиации зимой диагностируется на станциях Варшава (Польша) и Брауншвайг (Германия): соответственно 11,8 и 8,7 % за десятилетие (25 и 22 Дж/см²). В то же время, на девяти станциях отмечаются незначимые отрицательные тренды. Максимальное ослабление радиации наблюдается на станциях Локарно-Монти (Швейцария) и Страсбург-Энцхейм (Франция) — около 6 % (44 и 24 Дж/см²). Увеличение суммарной радиации на ряде станций зимой связано с увеличением рассеянной радиации и значительным преобладанием рассеянной радиации над прямой радиацией в этот сезон. На большинстве европейских станций отношение рассеянной радиации к суммарной в декабре—феврале составляет 70—90 %.

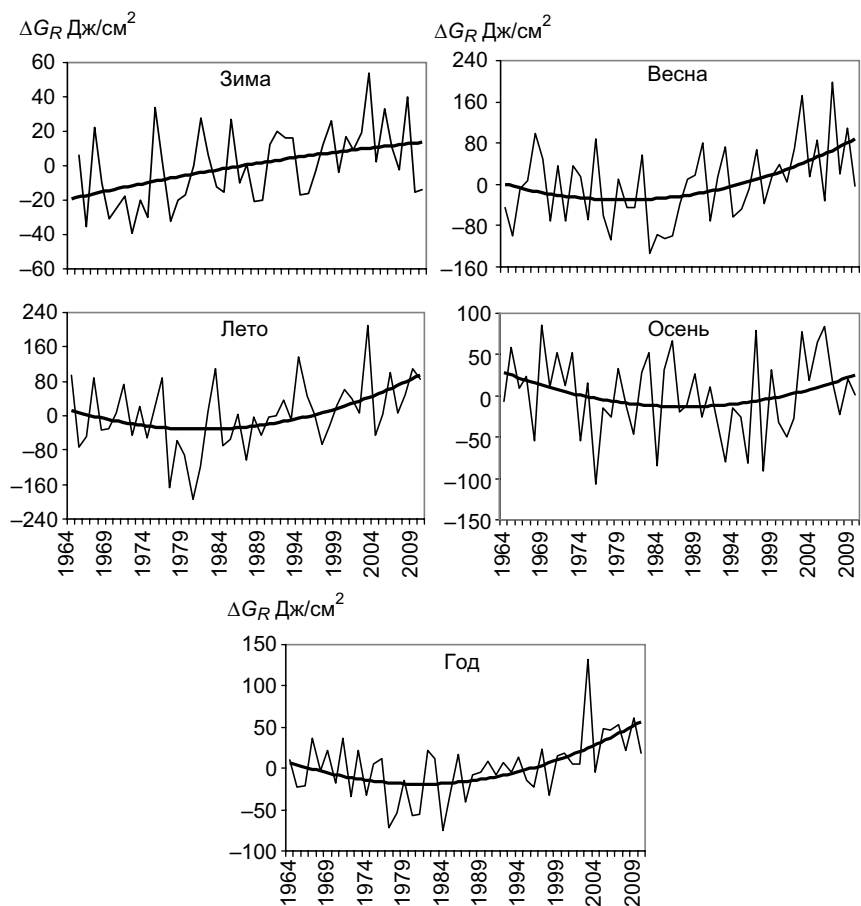


Рис. 3. Отклонения от средних за сезон и за год значений суммарной радиации, осредненные по территории центральной и восточной Европы.

В другие сезоны на большинстве станций с 1964 по 1989 г. произошло уменьшение поступления радиации, но достоверная вероятность коэффициентов линейного тренда, как правило, не превышает 90 %. Значения относительных отрицательных трендов сезонных значений составляют в среднем 1—3 % за 10 лет. Наибольший по величине тренд отмечается в весенний

период на станции Локарно-Монти (8 %, или 141 Дж/см²), летом на станциях Бельск (Польша) и Москва (5,9 и 5 %, или 114 и 94 Дж/см² соответственно), осенью на станции Сент-Юбер (Бельгия) (6,9 %, или 49 Дж/см²). По данным 24 актинометрических станций, средние за год значения суммарной радиации уменьшились в среднем на 1,7 %, наиболее значительно на станциях Штрбске-Плесо (Словакия) и Локарно-Монти (на 6,9 и 5,7 %, или 83 и 79 Дж/см² соответственно).

В рассматриваемый период отмечаются все минимумы 47-летнего хода региональных значений суммарной радиации: зимний минимум 1972 г., весенний минимум 1983 г., два летних минимума 1977 и 1980 гг. и осенний минимум 1976 г.

В период с 1990 по 2010 г. в центральной и восточной части Европы, как и в северо-западной, произошло увеличение прихода солнечной радиации в среднем на 3,2 % за 10 лет, на отдельных станциях до 7 % (табл. 1). Лишь на станции Зонблик (Австрия) во временном ходе суммарной радиации диагностируется незначительный отрицательный тренд. На остальных станциях временной ход годовых значений радиации характеризуется положительным трендом, причем в восьми случаях тренд является значимым.

Наиболее существенное возрастание суммарной радиации отмечается в весенний и осенний сезоны (в среднем на 3,6 и 5,6 % соответственно). Это в определенной степени связано с тем, что в конце 90-х годов прошлого столетия и в начале нынешнего имели место два весенних максимума радиации (2003 и 2007 гг.) и три осенних (1997, 2003, 2006 гг.). На некоторых станциях суммарная радиация увеличилась более чем на 10 % за десятилетие (Мелле, Сент-Юбер, Штрбске-Плесо). Зимний, летний и годовой максимумы радиации отмечены в 2003 г. Годовой максимум 2003 г. значительно превысил второй максимум, наблюдавшийся в 2009 г. (см. рис. 3).

Южный регион Европы. В южной Европе прослеживаются те же закономерности временного хода суммарной радиации, что и в других ее частях (рис. 4). Отрицательная тенденция прихода солнечной радиации в 1960—1980-х годах меняется на положи-

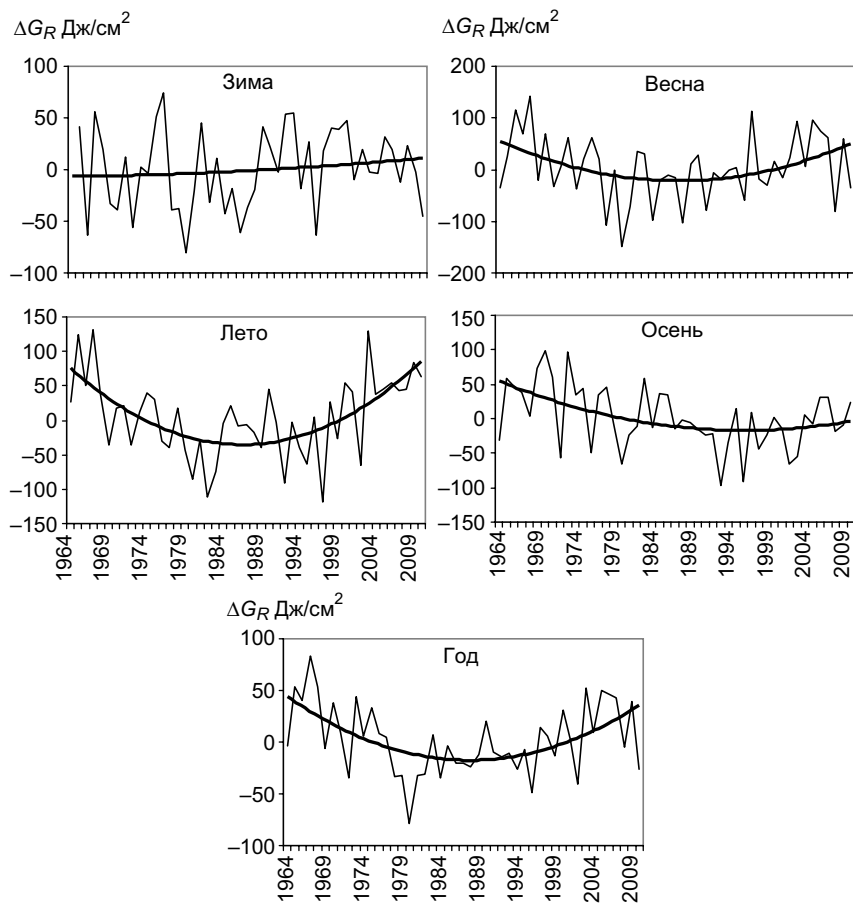


Рис. 4. Отклонения средних за сезон и за год значений суммарной радиации, осредненные по территории южной Европы.

тельную в 1990—2000-х годах. В первый из указанных периодов происходит уменьшение сезонных и годовых значений радиации в среднем на 1,5—3 % за 10 лет, во второй — их увеличение на 2—3 % во все сезоны за исключением зимнего. Зимой во временном ходе суммарной радиации, измеренной на девяти станциях, выявляется положительный тренд, а на остальных станциях — отрицательный, хотя, как правило, статистически незначимый.

В период с 1990 по 2010 г. отрицательный тренд зимой на большей части станций сохраняется.

На некоторых станциях южной Европы уменьшение радиации в 1964—1989 гг. достигает 6—8 %: на станции Коимбра (Португалия) зимой — 6,9 % (60 Дж/см²), на станции мыс Палинуро (Италия) весной и летом — 5,9 и 5,1 % (118 и 132 Дж/см²) соответственно, на станции Монпелье (Франция) осенью — 8,5 % (99 Дж/см²). В этот период отмечаются следующие экстремумы региональных значений суммарной радиации: зимние максимум в 1976 г. и минимум в 1979 г., весенние максимум в 1968 г. и минимум в 1982 г., два летних максимума в 1915 и 1967 гг. и минимум в 1982 г., осенние максимумы в 1970 и 1973 гг., годовые максимум в 1967 г. и минимум в 1980 г.

Наибольшее увеличение сезонных значений радиации в 1980—2010 гг. произошло на станции Констанца (Румыния) в весенний период (на 8,2 %, или 133 Дж/см²) и на станции Овьедо (Испания) в осенний период (на 7,4 %, или 64 Дж/см²). В последнее двадцатилетие весенний максимум значений радиации наблюдался в 1997 г., летние максимум и минимум — в 2003 и 1997 гг. соответственно, осенние минимумы в 1993 и 1996 гг.

Заключение

Сравнительный анализ сезонных и годовых значений суммарной солнечной радиации выявил схожие закономерности многолетнего изменения этого параметра на территории северо-западной, центральной, восточной и южной Европы в период с 1964 по 2010 г.

В 1960—1980-х годах наблюдается уменьшение поступления солнечной радиации на земную поверхность в весенний, летний и осенний сезоны в среднем на 2—4 % за десятилетие, до 8 % на отдельных станциях. На 17 актинометрических станциях отрицательные тренды являются статистически значимыми. Их доверительная вероятность превосходит 95 %. В зимний период на многих станциях отмечаются положительные тренды временного

хода радиации. Это явление связано с преобладанием доли рассеянной радиации в суммарной радиации в этот сезон.

В последующее двадцатилетие происходит увеличение прихода солнечной радиации в разные сезоны в среднем на 2—6 %, на отдельных станциях оно достигает 10—12 % за десятилетие. На 16 станциях положительные тренды статистически значимы. Исключение составляют несколько станций, где сохраняются отрицательные тренды значений радиации в зимний и весенний сезоны.

В начале наступившего века на большей части территории Европы значения суммарной радиации достигли уровня 60-х годов прошлого столетия.

Наблюдаемые во временном ходе суммарной радиации максимумы и минимумы повлияли на величину тренда, но не отразились на характере многолетней изменчивости этого параметра.

В последние несколько лет сохраняется положительный тренд прихода радиации на земную поверхность.

Выявленные тенденции временной изменчивости коротковолновой солнечной радиации свидетельствуют о крупномасштабном воздействии ряда факторов, связанных, прежде всего, с изменением содержания аэрозоля в атмосфере и облачности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абакумова Г. М. (2000). Тенденции многолетних изменений прозрачности атмосферы, облачности, солнечной радиации и альbedo подстилающей поверхности в Москве // *Метеорология и гидрология*. № 9. С. 51—62.

Житарчук Ю. В., Стадник В. В., Шанина И. Н. (1994). Исследование линейных трендов во временных рядах солнечной радиации // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 30, № 3. С. 389—396.

Климат Санкт-Петербурга и его изменения (2010) / Под ред. В. П. Мелешко, А. В. Мещерской, Е. И. Хлебниковой. — СПб. 256 с.

Махоткина Е. Л., Плахина И. Н. (2011). Пространственно-временные изменения мутности атмосферы на территории России / В сб.: *Труды Международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика»*. — СПб, с. 142—143.

Руссак В. К. (1994). Изменение радиационного режима в Эстонии // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 30, № 3. С. 397—401.

Хлебникова Е. И., Салль И. А., Стадник В. В., Трофимова О. В. (2011). Климатические изменения составляющих радиационного баланса подстилающей

поверхности на территории России в системе мониторинга атмосферы / В сб.: Труды Международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика». — СПб, с. 156—157.

Цветков А. В., Самукова Е. А. (2011). Характер изменений суммарной солнечной радиации в Европе за последние сорок лет / В сб.: Труды Международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика». — СПб, с. 150—151.

Abakumova G. M., Feigelson E. M., Russak V. K., Stadnik V. V. (1996). Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness and surface temperature on the territory of the former Soviet Union // *J. Clim.* V. 9. P. 1319—1327.

Abakumova G. M., Gorbarenko E. V., Nezval E. I., Shilovtseva O. A. (2008). Fifty years of actinometrical measurements in Moscow // *Int. J. Rem. Sens.* V. 29, is. 9. P. 2629—2665.

Alpert P., Kishcha P. (2008). Quantification of the effect of urbanization on solar dimming // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L08801, doi:10.1029/2007GL033012.

Alpert P., Kishcha P., Kaufman Y.J., Schwarzbard R. (2005). Global dimming or local dimming?: Effect of urbanization on sunlight availability // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L17802, doi:10.1029/2005GL023320.

Erme K., Kallis A., Veismann U., Ansko I. (2009). Long-term variations of available solar radiation on seasonal timescales in 1955—2006 at Tartu-Txravere Meteorological Station, Estonia // *Theor. Appl. Climatol.* DOI 10.1007/s00704-009-0226-6.

Gilgen H., Roesch A., Wild M., Ohmura A. (2009). Decadal changes of shortwave irradiance at the surface in the period 1960 to 2000 estimated from Global Energy Balance Archive // *J. Geophys. Res.* V. 114, D00D08, doi:10.1029/2008JD011383.

Gilgen H., Wild M., Ohmura A. (1998). Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from GEBA // *J. Clim.* V. 11. P. 2042—2061.

Grinenes A. A., Thue-Hansen V. (2006). The reduction of global radiation in south-eastern Norway during the last 50 years // *Theor. Appl. Climatol.* V. 85. P. 37—40.

Liepert B. G., Kukla G. (1997). Declines in global solar radiation with increased horizontal visibility in Germany between 1964 and 1990 // *J. Clim.* V.10. P. 2391—2401.

Norris J. R., Wild M. (2007). Trends in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover, solar “dimming” and solar “brightening” // *J. Geophys. Res.* V. 112. D08214, doi:10.1029/2006JD007794.

Ohmura A. (2009). Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes // *J. Geophys. Res.* V. 114. D00D05, doi:10.1029/2008JD011290.

Power H. C. (2003). Trends in solar radiation over Germany and an assessment of the role of aerosols and sunshine duration // *Theor. Appl. Climatol.* V. 76. P. 47—63.

Russak V. (1990). Trends of solar radiation, cloudiness and atmospheric transparency during recent decades in Estonia // Tellus. Ser. B. V. 42. P. 206—210.

Stjern C. W., Kristjansson J. E., Hansen A.W. (2009). Global dimming and global brightening: An analysis of surface radiation and cloud cover data in northern Europe // Int. J. Climatol. V. 29. P. 643—653.

Wild M. (2009). Global dimming and brightening: A review // J. Geophys. Res. V. 114. D00D16, doi:10.1029/2008JD011470.

Wild M. (2012). Enlightening global dimming and brightening // Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 93. P. 27—37.

Wild M., Trüssel B., Ohmura A., Long C. N., Dutton E. G., König-Langlo G., Tsvetkov A. (2009). Global dimming and brightening: An update beyond 2000 // J. Geophys. Res. V. 114. D00D13, doi:10.1029/2008JD011382.

УДК 551.594.21

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ,
СОЗДАВАЕМОГО ИОНОСФЕРНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ,
В НИЖНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ**

В. Н. Морозов

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: vn.morozov@inbox.ru

Поступила в редакцию 9.02.2012

Введение

Одной из важных проблем в теории глобальной атмосферно-электрической цепи (ГАЭЦ) является задание высотного профиля электрической проводимости атмосферы. Обычно при построении моделей ГАЭЦ предполагают, что профиль электрической проводимости атмосферы определяется выражением

$$\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-R_0)}, \quad \alpha = 0, 2 \dots 0,3 \text{ км}^{-1}, \quad (1)$$

где λ_0 — электрическая проводимость вблизи земной поверхности, R_0 — радиус Земли, r — радиальная координата в сферической системе координат с началом в центре Земли.

В работах Hays, Roble (1979) и Roble, Hays (1979) была построена модель ГАЭЦ в предположении, что электрическая проводимость в пограничном слое атмосферы определяется выражением

$$\lambda = \lambda_1(\theta, \phi) e^{\alpha_1(r-R_0)}, \quad (2)$$

где $\lambda_1(\theta, \phi)$ — электрическая проводимость на уровне моря, θ и ϕ — углы в сферической системе координат.

Выше пограничного слоя электрическая проводимость определялась выражением (1). В то же время, в работе Cole, Pierce

(1965) указывалось, что в ряде случаев электрическая проводимость может быть представлена в виде трех экспонент.

В настоящей работе решается задача о распределении в нижних слоях атмосферы электрического поля, создаваемого ионосферным генератором, который действует в верхних слоях атмосферы, для атмосферы с электрической проводимостью в виде трех экспонент. Полученные результаты сравниваются с результатами расчетов по модели с электрической проводимостью (1), что имеет важное значение для интерпретации экспериментальных данных по измерению напряженности электрического поля, полученных как при наземных, так и при высотных измерениях.

1. Постановка задачи и метод ее решения

Основное уравнение для решения рассматриваемой задачи имеет следующий вид:

$$\operatorname{div}(\lambda \vec{E}) = 0, \quad \vec{E} = -\operatorname{grad}\varphi,$$

где \vec{E} — напряженность электрического поля, φ — потенциал электрического поля.

В сферической системе координат с началом в центре Земли, предположив, что электрическая проводимость λ не зависит от углов в этой системе координат, получим уравнение, описывающее распределение потенциала электрического поля в нижних слоях атмосферы:

$$\lambda(r) \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \Delta_{\theta, \phi} \varphi \right] + \frac{d\lambda}{dr} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$\Delta_{\theta, \phi} \varphi = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \phi^2}.$$

Для решения задачи электрическая проводимость задается в виде совокупности трех экспонент (Атмосфера, 1991):

$$\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha_1(r-R_0)}, \quad r - R_0 \in [0; 3,6 \text{ км}], \quad \alpha_1 = \frac{1}{0,82} \text{ км}^{-1},$$

$$\lambda(r) = \lambda_1 e^{\alpha_2(r-R_0-3,6)}, \quad r - R_0 \in [3,6; 17,7 \text{ км}], \quad \alpha_2 = \frac{1}{4,1} \text{ км}^{-1}, \quad (4)$$

$$\lambda(r) = \lambda_2 e^{\alpha_3(r-R_0-17,7)}, \quad r - R_0 \in [17,7; 70 \text{ км}], \quad \alpha_3 = \frac{1}{7,0} \text{ км}^{-1},$$

где $\lambda_1 = \lambda(3,6 \text{ км})$, $\lambda_2 = \lambda(17,7 \text{ км})$.

Граничные условия для решения уравнения (3) записываются в следующем виде:

$$\varphi(r = R_0) = 0, \quad \varphi(r = r_3) = \varphi(r_3, \theta, \phi), \quad (5)$$

где r_3 — верхняя граница сферического конденсатора, находящаяся в ионосфере.

В граничных условиях на верхней границе сферического конденсатора задано распределение потенциала электрического поля, обусловленное действием генераторов в верхних слоях атмосферы.

Используя разложение по сферическим гармоникам (Джексон, 1965)

$$\begin{aligned} \varphi(r, \theta, \phi) &= \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \varphi_{ij}(r) Y_{ij}(\theta, \phi), \\ \varphi_{ij}(r) &= \iint_{\Omega} d\Omega Y_{ij}^*(\theta, \phi) \varphi(r, \theta, \phi), \quad d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (6)$$

и считая выполненным условие $\alpha_l \gg \frac{2}{R_0}$, $l = 1, 2, 3$, получим в

каждом из слоев, где имеют место различные представления электрической проводимости (4), следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\varphi_{1,ij}}{dr^2} + \alpha_1 \frac{d\varphi_{1,ij}}{dr} - \frac{\mu}{R_0^2}\varphi_{1,ij} &= 0, \quad r - R_0 \in [0; 3,6 \text{ км}], \\ \frac{d^2\varphi_{2,ij}}{dr^2} + \alpha_2 \frac{d\varphi_{2,ij}}{dr} - \frac{\mu}{R_0^2}\varphi_{2,ij} &= 0, \quad r - R_0 \in [3,6; 17,7 \text{ км}], \\ \frac{d^2\varphi_{3,ij}}{dr^2} + \alpha_3 \frac{d\varphi_{3,ij}}{dr} - \frac{\mu}{R_0^2}\varphi_{3,ij} &= 0, \quad r - R_0 \in [17,7; 70 \text{ км}], \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mu = i(i + 1)$, $i = 0, 1, 2, \dots$

Граничные условия для решения этой системы уравнений имеют вид

$$\varphi_{1,ij}(R_0) = 0, \quad \varphi_{3,ij}(r_3) = \bar{\varphi}_{i,j}, \quad \bar{\varphi}_{i,j} = \iint_{\Omega} d\Omega Y_{ij}^*(\theta, \phi) \varphi(r_3, \theta, \phi). \quad (8)$$

Решение каждого уравнения системы (7) представляется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \varphi_{1,ij}(r) &= C_{1,ij}e^{\beta_{11}r} + C_{2,ij}e^{\beta_{21}r}, \quad \beta_{11,21} = \frac{-\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 + 4\mu/R_0^2}}{2}, \\ \varphi_{2,ij}(r) &= C_{3,ij}e^{\beta_{12}r} + C_{4,ij}e^{\beta_{22}r}, \quad \beta_{12,22} = \frac{-\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^2 + 4\mu/R_0^2}}{2}, \\ \varphi_{3,ij}(r) &= C_{5,ij}e^{\beta_{13}r} + C_{6,ij}e^{\beta_{23}r}, \quad \beta_{13,23} = \frac{-\alpha_3 \pm \sqrt{\alpha_3^2 + 4\mu/R_0^2}}{2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $C_{1,ij}, C_{2,ij}, C_{3,ij}, C_{4,ij}, C_{5,ij}, C_{6,ij}$ — постоянные.

Для определения этих постоянных воспользуемся условиями непрерывности функций $\varphi_{k,ij}$, $k = 1, 2, 3$, и их производных на границах слоев:

$$\begin{aligned} \varphi_{1,ij}(r_1) &= \varphi_{2,ij}(r_1), & \varphi_{2,ij}(r_2) &= \varphi_{3,ij}(r_2), \\ \frac{d\varphi_{1,ij}}{dr} \Big|_{r=r_1} &= \frac{d\varphi_{2,ij}}{dr} \Big|_{r=r_1}, & \frac{d\varphi_{2,ij}}{dr} \Big|_{r=r_2} &= \frac{d\varphi_{3,ij}}{dr} \Big|_{r=r_2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Вычислив с помощью соотношений (9), граничных условий (8) и условий (10) постоянные $C_{1,ij}$, $C_{2,ij}$, $C_{3,ij}$, $C_{4,ij}$, $C_{5,ij}$, $C_{6,ij}$ и подставив полученные решения в (6), получим следующие выражения, описывающие распределения потенциала электрического поля в каждом слое:

$$\begin{aligned} \varphi_1(r, \theta, \phi) &= \frac{\varphi(r_3, \theta, \phi)}{\Sigma} \left(\mathbf{1} - e^{-\alpha_1(r-R_0)} \right) \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \\ \varphi_2(r, \theta, \phi) &= \frac{\varphi(r_3, \theta, \phi)}{\Sigma} \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(\mathbf{1} - e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} - e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} e^{-\alpha_2(r-r_1)} \right], \\ \varphi_3(r, \theta, \phi) &= \frac{\varphi(r_3, \theta, \phi)}{\Sigma} \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(\mathbf{1} - e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} \right) + e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} - \right. \\ &\quad \left. - e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} e^{-\alpha_2(r-r_1)} + \frac{\alpha_2}{\alpha_3} e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} e^{-\alpha_2(r_2-r_1)} \left(\mathbf{1} - e^{-\alpha_3(r-r_2)} \right) \right], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Sigma &= \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(\mathbf{1} - e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} \right) + e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} - \\ &\quad - e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} e^{-\alpha_2(r-r_1)} + \frac{\alpha_2}{\alpha_3} e^{-\alpha_1(r_1-R_0)} e^{-\alpha_2(r_2-r_1)} \left(\mathbf{1} - e^{-\alpha_3(r_3-r_2)} \right). \end{aligned}$$

При $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ все выражения (11) сводятся к одному (Морозов, 2011):

$$\varphi(r, \theta, \phi) = \varphi(r_3, \theta, \phi) \frac{\mathbf{1} - e^{-\alpha(r-R_0)}}{\mathbf{1} - e^{-\alpha(r_3-R_0)}}. \quad (12)$$

Подсчитаем напряженность электрического поля в первом слое вблизи земной поверхности. Из первого выражения (11), описывающего распределение электрического потенциала в слое вблизи земной поверхности, получим:

$$E_{r_1} = -\frac{\partial\varphi_1(r, \theta, \phi)}{\partial r} = -\frac{\alpha_2}{\Sigma} \varphi(r_3, \theta, \phi) e^{-\alpha_1(r-R_0)}. \quad (13)$$

По результатам расчетов $\Sigma \approx 0,216$, и для напряженности электрического поля вблизи земной поверхности находим:

$$E_{r_1} = -\frac{\partial\varphi_1(r, \theta, \phi)}{\partial r} = -1,129\varphi(r_3, \theta, \phi) e^{-\alpha_1(r-R_0)}. \quad (14)$$

В то же время, при $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0,2 \text{ км}^{-1}$ получим:

$$E_{r_1} = -\frac{\partial\varphi_1(r, \theta, \phi)}{\partial r} = -0,2\varphi(r_3, \theta, \phi) e^{-\alpha_1(r-R_0)}. \quad (15)$$

Сравнение выражений (14) и (15) показывает, что в случае трехслойного распределения электрической проводимости напряженность электрического поля возрастает почти в пять раз при заданном распределении электрического потенциала в ионосфере. Проведенные модельные расчеты должны дополняться экспериментами по определению вертикального профиля электрической проводимости в атмосфере.

2. Оценка времени установления стационарного электрического состояния атмосферы при включении ионосферного электрического генератора

Для задач атмосферного электричества, связанных с исследованием влияния ионосферных электрических полей на электрическое поле приземного слоя представляет интерес задача об установлении стационарного электрического поля в нижней атмосфере при включении в некоторый момент времени ионосферного электрического поля. Для решения этой задачи воспользуемся результатами, полу-

ченными ранее в работе Морозова (2007). Из результатов, полученных в этой работе, следует выражение для плотности нестационарного электрического тока в атмосфере $j_0(t)$ для случая, когда электрический потенциал ионосферы меняется в соответствии с формулой $\varphi_\infty(t) = \varphi_\infty^0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, а электрическая проводимость изменяется с высотой в соответствии с выражением (1) и $\tau \neq \tau_0$:

$$j_0(t) = -\alpha\varphi_\infty^0\lambda_0 \left\{ \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \int_0^\infty \frac{d\bar{z} \left[e^{-\frac{t}{\tau}(1+\bar{z})} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right]}{(\ln^2 \bar{z} + \pi^2) \left[\frac{\tau}{\tau_0}(1+\bar{z}) - 1 \right]} \right\}, \quad (16)$$

где $\tau_0 = (4\pi\lambda_0)^{-1}$ — время электрической релаксации вблизи земной поверхности.

При $\tau = \tau_0$ получим следующее выражение для плотности электрического тока:

$$j_0(t) = -\alpha\varphi_\infty^0\lambda_0 \left[1 - \int_0^\infty \frac{d\bar{z} e^{-\frac{t}{\tau_0}(1+\bar{z})}}{(\ln^2 \bar{z} + \pi^2)\bar{z}} \right]. \quad (17)$$

В предельном случае $\tau \ll \tau_0$ вместо (16) получим

$$j_0(t) = -\lambda_0\varphi_\infty^0\alpha \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau_0}} \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{t}{\tau_0}\bar{z}}}{\ln^2 \bar{z} + \pi^2} d\bar{z} \right). \quad (18)$$

Напряженность электрического поля при $z = 0$ описывается выражением

$$E_z(0, t) = -\alpha\varphi_\infty^0 \left\{ \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \int_0^\infty \frac{d\bar{z} \left[e^{-\frac{t}{\tau}(1+\bar{z})} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right]}{\bar{z}(\ln^2 \bar{z} + \pi^2) \left[1 - \frac{\tau}{\tau_0}(1+\bar{z}) \right]} \right\}. \quad (19)$$

При $\tau \ll \tau_0$ находим

$$E_z(0, t) = -\alpha\varphi_\infty^0 \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \int_0^\infty \frac{d\bar{z} e^{-\frac{t}{\tau_0} \bar{z}}}{\bar{z}(\ln^2 \bar{z} + \pi^2)} \right]. \quad (20)$$

Воспользовавшись формулами (16) и (19), получим для плотности электрического тока:

$$j_0(t) = \lambda_0 E_z(0, t) + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E_z}{\partial t}(0, t). \quad (21)$$

Таким образом, плотность электрического тока, которая иначе называется максвелловской плотностью тока, равна сумме плотности тока проводимости и тока смещения.

Результаты расчетов по формулам (16) и (19), иллюстрирующих процесс установления стационарного электрического поля при включении ионосферного генератора, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Релаксация напряженности электрического поля для

$$\varphi_\infty(t) = \varphi_\infty^0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad \tau = 100 \text{ с}, \quad \tau_0 = 600 \text{ с}$$

t/τ	0,1	1,0	6,0	10
$-E_z(0, t)/\alpha\varphi_\infty^0$	0,026	0,281	0,791	0,910

Таблица 2

Релаксация напряженности электрического поля для

$$\varphi_\infty(t) = \varphi_\infty^0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad \tau \ll \tau_0, \quad \tau_0 = 600 \text{ с}$$

t/τ	0,1	1,0	10
$-E_z(0, t)/\alpha\varphi_\infty^0$	0,459	0,852	1,000

Используя результаты работы Морозова (2007), можно рассмотреть диссипацию электрического поля для случая, когда $\varphi_\infty(t) = 0$ и $E_z(z, 0) = E_{z0}e^{-\alpha z}$. Тогда для напряженности электрического поля при $z = 0$ получим

$$E_z(0, t) = E_{z0}e^{-\frac{t}{\tau_0}} \int_0^\infty \frac{d\bar{z} e^{-\frac{t}{\tau_0} \bar{z}}}{\bar{z}(\ln^2 \bar{z} + \pi^2)}, \quad (22)$$

а плотность электрического тока будет равна

$$j_0(t) = \lambda_0 E_{z0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{t}{\tau_0} \bar{z}}}{\ln^2 \bar{z} + \pi^2} d\bar{z}. \quad (23)$$

Результаты расчетов по этим формулам, приведенные в табл. 3, показывают что диссипация электрического поля и соответственно плотности электрического тока происходит быстрее, чем по экспоненциальному закону.

Таблица 3

Диссипация электрического поля и плотности электрического тока

t/τ_0	e^{-t/τ_0}	$E_z(0, t)/E_{z0}$	$j_0(t)/\lambda_0 E_{z0}$
0,1	0,905	0,541	0,663
1,0	0,368	0,148	0,033
10	$4,54 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	0,00...

Из табл. 2 следует, что в случае когда время установления ионосферного генератора τ гораздо меньше, чем время электрической релаксации вблизи земной поверхности τ_0 , электрические свойства ионосферного генератора проявляются через время порядка нескольких τ_0 . Это обстоятельство следует учитывать при обработке экспериментальных данных, связывающих электрические поля в ионосфере с электрическими полями в приземном слое.

Заключение

Результаты решения рассмотренных в настоящей работе задач позволяют сделать следующие выводы.

1. Трансформация ионосферных электрических полей в электрические поля приземного слоя существенно зависит от высотного профиля электрической проводимости атмосферы. Поэтому необходимы экспериментальные работы по определению этого профиля с помощью аэростатов и самолетов-лабораторий в районах проведения этих исследований.

2. Рассмотрение нестационарной задачи показывает временное запаздывание проявления изменений электрических полей в приземном слое по сравнению с изменениями электрического потенциала ионосферы.

3. Показано ускорение диссипации электрического поля и плотности электрического тока при отсутствии генераторов электрического поля по сравнению с экспоненциальным распадом. Такое ускорение обусловлено неоднородной электрической проводимостью атмосферы.

Полученные теоретические результаты планируется использовать при интерпретации экспериментальных результатов, полученных при вертикальном зондировании атмосферы с помощью самолетов-лабораторий.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы (государственный контракт № П781 от 24 мая 2010 г.) по направлению «Физика атмосферы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атмосфера. Справочник (1991). — Л.: Гидрометеиздат. 509 с.
- Джексон Дж. (1965). Классическая электродинамика — М.: Мир. 702 с.
- Морозов В. Н. (2007). К расчету временных изменений электрического поля атмосферы // Труды ГГО. Вып. 556. С. 235—254.
- Морозов В. Н. (2011). Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. — СПб: РГГМУ. 252 с.

Hays P. B., Roble R. G. (1979). A quasi-static model of global atmospheric electricity. I. The lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 84. No. A7. P. 3291—3305.

Roble R. G., Hays P. B. (1979). A quasi-static model of global atmospheric electricity. II. Electrical coupling between the upper and lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 84. No. A12. P. 7247—7256.

Cole R. K., Pierce E. T. (1965). Electrification in the Earth's atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 70. No. 12. P. 2735—2749.

УДК 551.509.543

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ
ЗАРЯЖЕННОГО ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО РЕАГЕНТА
ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО ВЫЗЫВАНИЯ ОСАДКОВ
ИЗ ОБЛАКОВ**

В. Н. Козлов, В. В. Клинго

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, Карбышева, 7
E-mail: vladimir36@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2011
После доработки 14.02.2012

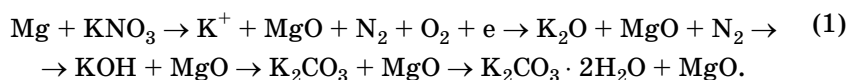
Введение

В настоящей работе представлено теоретическое описание последовательности физических процессов, протекающих после введения в облачную среду мощных конвективных облаков на стадии развития заряженного гигроскопического реагента. Действие этого реагента качественно отличается от действия хорошо известных льдообразующих и гигроскопических реагентов. В теплых конвективных облаках нельзя объяснить процесс образования осадков за короткий промежуток времени только процессами конденсации и гравитационной коагуляции. Вопрос о росте облачных капель радиусом от 5 до 20 мкм остается не решенным в классической теории образования осадков. Вопрос о влиянии электрических сил на процесс укрупнения облачных капель в указанном диапазоне возник в связи с объяснением укрупнения облачных элементов от замедления конденсационного роста капель радиусом 2—5 мкм до начала гравитационной коагуляции капель радиусом 18—20 мкм. Разработка реагента с иными физическими принципами действия на облака соответствует рекомендациям VII Научной конференции ВМО по модификации погоды.

Исторические сведения

Заряженные частицы в атмосфере (электроны, генерируемые космическими лучами, радиоактивностью и другими факторами) являются основными источниками ионизации воздуха и играют существенную роль в процессе осадкообразования в естественных условиях (Стожков и др., 1996). Впервые С. Вильсон обратил внимание на то, что в камере с пересыщением до 400 % водяной пар конденсируется при введении ионов. Влияние заряженных частиц на интенсивность осадков в атмосфере рассматривалось в ряде работ (Левин, Седунов, 1967; Мучник, Фишман, 1982). Первые лабораторные опыты в СССР с целью исследования процесса коагуляции заряженным песком провел в 1921 г. В. И. Виткевич. Теоретические основы этого метода пытались объяснить Б. П. Вайнберг и Н. А. Булгаков. В 30-х годах В. Н. Оболенский испытывал методы воздействия на облака, включая высокочастотные разряды и ионные потоки. Первое изобретение по регулированию зарядов в облаке было сделано в СССР в 1931 г. (А.с № 30033). Вопросы влияния электрических сил на конденсационно-коагуляционные процессы в разные годы рассматривались Б. Дж. Мейсоном (1961), В. М. Мучником (1974), Л. М. Левиным (1961), Н. С. Шишкиным (1964), Н. В. Красногорской (1976) и другими исследователями.

Разработка искусственных источников ионизации основывалась на пиротехническом способе диспергирования реагента. Пиротехнический состав (ПС) для генерации заряженного аэрозоля получается из смеси порошкообразного металлического горючего (магний или его сплавы), окислителя (селитра калиевая или других щелочных металлов) и небольших добавок органического вещества (Козлов и др., 1997). Схематично реакции, происходящие при горении ПС при температуре 4000—4500 К, можно представить следующим образом:



ПС снаряжается в макетах пиропатронов ПВ-26 в количестве 40 г. Горение ПС в атмосфере длится 16—18 с, протяженность

траектории движения 800—900 м. Основным механизмом ионизации облачной среды является термоэлектронная эмиссия с горячих аэрозольных частиц по траектории движения их источника — горящего ПС. Общее количество электронов эмиссии определяется продолжительностью сохранения высокой температуры образовавшихся частиц. Потеря электронов горячими частицами обуславливает их положительный заряд. Гигроскопичность определяется образованием карбоната калия K_2CO_3 (поташ), хорошо растворимого в воде.

Электроны эмиссии с образовавшихся горячих частиц

Продукты сгорания пиротехнических составов представляют собой различные соли и окислы (Шидловский, 1973). Результаты испытаний ПС в камере туманов приведены на рис. 1.

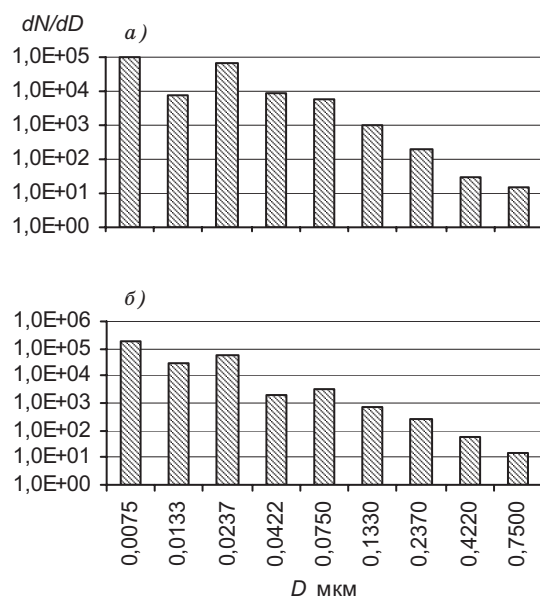


Рис. 1. Плотность распределения частиц горения ПС по размерам в момент генерации (а) и после выдержки в течение 30 мин (б).

Концентрация электронов эмиссии $N_э$ в воздушной среде у поверхности частиц зависит от температуры (T) и термоэлектронной работы выхода Φ .

Таблица 1 иллюстрирует зависимость $N_э$ от T и Φ . Здесь не принимается во внимание действие положительного заряда частиц после начала эмиссии электронов, электрическое поле которого препятствует удалению электронов от поверхности частицы, возвращая вылетевшие электроны назад в объем частицы.

Таблица 1

Концентрация электронов эмиссии $N_э$, см^{-3} у поверхности частиц, рассчитанная в зависимости от температуры T и термоэлектронной работы выхода Φ

Φ эВ	T К			
	2000	1500	1000	700
5,14	$4,93 \cdot 10^7$	$1,56 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	0
4,0	$3,66 \cdot 10^{10}$	$2,17 \cdot 10^7$	1,10	0
3,0	$1,20 \cdot 10^{13}$	$2,38 \cdot 10^{10}$	$1,19 \cdot 10^5$	$2,34 \cdot 10^{-2}$
1,8	$1,26 \cdot 10^{16}$	$2,53 \cdot 10^{14}$	$1,31 \cdot 10^{11}$	$1,00 \cdot 10^7$
1,25	$3,06 \cdot 10^{17}$	$1,78 \cdot 10^{16}$	$7,72 \cdot 10^{13}$	$9,08 \cdot 10^{10}$
0,71	$7,05 \cdot 10^{18}$	$1,15 \cdot 10^{18}$	$4,05 \cdot 10^{16}$	$9,96 \cdot 10^{14}$

По мере эмиссии электронов частица приобретает все больший положительный заряд, электрическое поле которого должны преодолевать электроны, чтобы покинуть частицу. После прекращения эмиссии положительный заряд частицы достигает наибольшего значения.

Пусть окончательный заряд частицы соответствует испусканию $N_э$ электронов. Тогда частицу за все время эмиссии заведомо покинут электроны, имеющие минимальную скорость $v_{T,0}$ при условии

$$\frac{mv_{T,0}^2}{2} > \frac{eq}{r}, \quad q = eN_э, \quad N_э < 0,987 \cdot 10^{-13} v_{T,0}^2, \quad (2)$$

если радиус частицы $r = 5 \cdot 10^{-5}$ см, а количественное значение заряда электрона $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ. Таким образом, полное число электронов эмиссии будет включать спектр их скоростей от $v_{T,0}$ до ∞ .

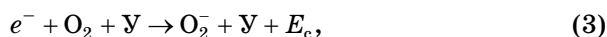
Остается подчеркнуть, что N_s является оценкой числа электронов эмиссии снизу, поскольку учитываются только электроны с минимальной скоростью $v_{T,0}$. Предельный заряд твердой частицы радиусом $5 \cdot 10^{-5}$ см в соответствии с работой Мучника, Фишмана (1982) составляет $\sim 1,7 \cdot 10^5 e$.

Реакции образования отрицательных ионов электронами эмиссии

Обратимся к судьбе электронов эмиссии, оказавшихся в естественной атмосферной среде. Различные реакции образования отрицательных ионов в результате неупругого столкновения электронов с газовыми молекулами детально рассмотрены в работах Месси (1979), Pruppacher, Klett (1978), а также схематично представлены в работе Schlamp et al. (1976). Применительно к плотной газовой среде и величинам энергий электронов эмиссии решающее значение будет иметь реакция тройного столкновения с образованием отрицательных ионов молекул кислорода (отрицательных ионов молекул азота не существует).

Электрон сталкивается с молекулой O_2 и захватывается ею с одновременным столкновением с какой-либо молекулой атмосферного воздуха: азота, кислорода или водяного пара. Захваченный молекулой O_2 электрон теряет энергию, равную энергии сродства электрона к этой молекуле E_c . Чтобы не нарушался закон сохранения энергии, эту энергию E_c нужно отдать, в частности, третьему телу. Без третьего тела образовавшийся на короткое время отрицательный ион O_2^- был бы неустойчивым — произошел бы автоотрыв электрона.

Схематично реакцию тройного столкновения запишем в виде



где Y — какая-либо молекула атмосферного воздуха (N_2 , O_2 , H_2O), которая отбирает энергию E_c .

Если n^- — концентрация образовавшихся отрицательных ионов молекул O_2 за время эмиссии электронов $t_{пр}$, то

$$n^- = K_t n n_t n_e t_{пр}, \quad (4)$$

где K_t — константа тройного столкновения; n , n_t и n_e — соответственно концентрация молекул кислорода, третьего тела и электронов, принимающих участие в столкновениях.

Не вдаваясь в детали механизма образования ионов O_2^- , приведем только само значение K_t для энергии электронов эмиссии до 1 эВ. Оценка $K_t \approx 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$ может быть получена из простых теоретических соображений механизма тройного столкновения. По экспериментальным данным, константа этой реакции имеет тот же порядок при слабой зависимости от энергии электронов.

Средняя длина свободного пробега электронов до столкновения их с молекулами азота, кислорода и даже водяного пара при концентрации этих газов в атмосферном воздухе значительно меньше длины свободного пробега электронов эмитирующих частиц. Из формулы(4) при указанных выше значениях n и n_t получаем $K_t n n_t > 1$. Это означает, что все электроны эмиссии пошли на образование ионов O_2^- .

Известно, что в естественном атмосферном воздухе образовавшиеся мономолекулярные ионы, в частности ионы молекул кислорода, «практически мгновенно» (Красногорская, Неизвестный, 1976) присоединяют 10—15 нейтральных молекул, превращаясь в устойчивые комплексы — легкие ионы. Перенесем это из естественных температурных условий в атмосфере на температуру до 2000 К. При столь высокой температуре сохраняется достаточно

высокая плотность атмосферного воздуха при большей тепловой скорости молекул. Частота столкновений молекул с ионами остается еще очень высокой. Это дает основание считать, что и при столь высоких температурах все отрицательные ионы O_2^- , захватывая нейтральные молекулы, станут центрами легких ионов.

Взаимодействие легких ионов с частицами — продуктами сгорания пиротехнического состава

Как уже было сказано ранее, твердые горячие частицы радиусом 10^{-6} — 10^{-4} см образуются терموконденсационным способом. Температура источника резко уменьшается от центра к периферии. Упрощение дальнейших расчетов состоит в подразделении всей области источника на очень малую область с температурой до 3000 К и остальную, большую часть области со значительно более низкой температурой. Частицы, образующиеся из меньшей области, имеют температуру эмиссии до 2000 К; для частиц, образовавшихся из остальной области, эмиссией пренебрегаем. Доля общего числа образовавшихся частиц с эмиссией будет равна γ , а доля без эмиссии — $1 - \gamma$. Если число образовавшихся частиц пропорционально части площади источника, то $\gamma \ll 1$.

Для упомянутого выше пиропатрона массой 40 г при плотности пиротехнического состава 2 г/см^3 и среднем радиусе сферических частиц $5 \cdot 10^{-5}$ см полное его сгорание даст $N_p = 3,8 \cdot 10^{13}$ частиц.

Горячие частицы в результате эмиссии электронов приобретают положительный заряд. Отрицательные легкие ионы, попадая на частицы, его нейтрализуют. Очевидно, что на траектории движения источника в начальный период образования частиц эмиссии и ионов их концентрация и температура будут максимальными. Исследуем процесс взаимодействия отрицательных легких ионов с частицами в этой области, поскольку именно в этой области указанный процесс наиболее показателен.

Нейтрализация заряженных частиц ионами предполагает столкновения ионов с частицами. Очень важно знать, все ли столкнувшиеся легкие ионы останутся на поверхности частицы

или же часть их отразится от поверхности. Обычно считается, что всякое столкновение как твердых частиц между собой, так и легкого иона с аэрозольной частицей приводит к их объединению (Мучник, Фишман, 1982).

Средняя длина свободного пробега легкого иона λ_i в воздушной среде даже при самой высокой рассматриваемой температуре 2000 К не превышает $2,21 \cdot 10^{-6}$ см. Число Кнудсена (λ_i/r) составляет примерно 0,04, т. е. значительно меньше единицы. Значит, реализуется диффузионный режим попадания ионов на частицы радиусом $5 \cdot 10^{-5}$ см.

Попадание ионов на частицы обусловлено также электрическим взаимодействием положительно заряженных частиц с отрицательными ионами, которое выражается через подвижность ионов b . Подвижность ионов связана с их коэффициентом молекулярной диффузии D :

$$b = \frac{eD}{kT}, \quad (5)$$

где e — численное значение заряда электрона.

Соотношение (5), согласно работе Мессе (1979), без аргументации, справедливо только при условии, когда средняя энергия, приобретенная ионами в электрическом поле частицы, значительно меньше тепловой энергии иона:

$$\frac{m_{\text{ион}}}{2} v_T^{-2} \gg b^2 \left(\frac{N_s e}{r^2} \right)^2 \frac{m_{\text{ион}}}{2}, \quad (6)$$

или

$$b^2 \ll \frac{v_T^{-2}}{\left(\frac{N_s e}{r^2} \right)^2}.$$

При $r = 5 \cdot 10^{-5}$ см это условие выполняется для всех температур, при которых имеет место термоэлектронная эмиссия.

Диффузионный поток J_d на частицы без эмиссии описывается выражением

$$J_d = 4\pi D r n_p (1 - \gamma) \nu t. \quad (7)$$

Для частиц с эмиссией $1 - \gamma$ нужно заменить на γ , руководствуясь опять-таки тем, что все ионы, столкнувшиеся с частицами, останутся на их поверхности даже при температуре частиц ~ 2000 К.

Ионы попадают как на горячие частицы с эмиссией, так и на незаряженные относительно холодные частицы без эмиссии. При этом очень важно принять во внимание, что отрицательные ионы, попавшие на поверхность эмитирующих частиц, уменьшают положительный заряд этих частиц, а значит, уменьшают электрическое поле, которое ограничивает выход электронов в соответствии с формулой (2). Уменьшение величины этого поля увеличит число эмитирующих частиц, которые сразу образуют отрицательные легкие ионы молекулы O_2^- . Таким образом, можно считать, что, несмотря на преобладающее попадание отрицательных ионов на сильно заряженные частицы, их положительный заряд фактически не изменяется. Остается без изменения и общая концентрация отрицательных ионов. Следовательно, в процессе эмиссии эффект заряжения частиц сводится лишь к попаданию ионов на частицы без эмиссии и приобретение ими отрицательного заряда.

После прекращения эмиссии система со средним числом частиц $4,6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ и числом легких ионов $\sim 1,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ проходит в течение 0,3 с все стадии охлаждения от 1000 до 273 К. Уменьшение концентрации легких ионов после эмиссии будем считать пропорциональным уменьшению числа частиц при охлаждении от температуры эмиссии до 273 К: число легких ионов с концентрацией $1,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ при охлаждении уменьшается в $4,6 \cdot 10^7 / 1,0 \cdot 10^6 = 46$ раз. Таким образом, концентрация легких ионов составит $1,5 \cdot 10^8 / 46 = 3,3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.

**Некоторые сведения о значениях коэффициента захвата
заряженных капель в зависимости от их радиуса и заряда**

Исследования коагуляции заряженных облачных капель были проведены более 50 лет тому назад (Левин, Седунов, 1967). Наиболее достоверные значения коэффициента захвата заряженных капель E , по нашему мнению, были получены экспериментально (Красногорская, Неизвестный, 1973). Представляется целесообразным воспроизвести в форме таблицы значения E в зависимости от радиуса капель и их зарядов, установленных в работе Pruppacher, Klett (1978).

Таблица 2

Значение коэффициента захвата E заряженных капель в зависимости от их заряда и радиуса (по работе Pruppacher, Klett (1978))

Радиус капель, мкм		Заряд капель, $ e $		E
r_1	r_2	q_1	q_2	
5	2,5	-100	50	0,20
5	2,5	2000	-20	2,89
5	4	-2000	-20	4,43
5	4	2000	-20	5,46
5	4	2000	20	3,60

В работе Красногорской, Неизвестного (1973), кроме того, было установлено следующее:

1) капли с одинаковым радиусом 5 мкм с разноименными зарядами $144 e^-$ всегда сливаются, т. е. $E \geq 1$;

2) величина E не зависит от знака заряда при взаимодействии заряженной капли с зарядом $\sim 3 \cdot 10^4 e$ с нейтральной каплей радиусом 6,5 мкм;

3) при одинаковых зарядах капель эффективность их столкновения увеличивается, если размеры капель становятся все ближе друг к другу, а разноименные заряды капель возрастают;

4) коэффициент захвата одноименно заряженных капель больше коэффициента захвата системы заряженная капля—нейтральная капля, и это свидетельствует о том, что индукционные силы притяжения в случае одноименно заряженных капель больше кулоновских сил отталкивания. Однако при сравнительно больших значениях одноименно заряженных капель $q \approx -2 \cdot 10^3 e$ получаем $E = 10^{-3}$; с уменьшением заряда в 10 раз значение E быстро возрастает.

Большинство указанных закономерностей качественно понятно из самого механизма захвата сталкивающихся капель. Первая капля, чтобы столкнуться со второй каплей-коллектором, должна сойти с линии тока, обтекающей вторую каплю. Если размеры капли-коллектора значительно превосходят размеры набегающей капли, то их скорости движения сильно различаются. Время пребывания меньшей капли на линии тока большей капли малó. Наличие зарядов капель приводит к их кулоновскому притяжению. Меньшая капля сходит с линии тока, попадая на поверхность капли-коллектора.

Если же обе заряженные капли близки по размеру, то они движутся с приблизительно одинаковыми скоростями, длительное время электрически взаимодействуя. Это увеличивает вероятность того, что одна из капель сойдет с линии тока другой капли и сольется с ней.

Для ориентировочной оценки электрических зарядов капель, которые рассматриваются при электрической коагуляции, приведем рассчитанные значения предельных зарядов $q_{\text{пред}}$ капель в зависимости от их радиуса r . Значения этих зарядов получаются из приравнивания удвоенного значения поверхностного натяжения сферической капли энергии электростатического поля при равномерном распределении заряда капли по ее поверхности. Электростатическая энергия заряженной капли сдерживается ее поверхностным натяжением.

Из такого приравнивания при поверхностном натяжении 75,7 дин/см и $T = 0$ °C находим:

r мкм.....	0,5	1	3	5	10
$q_{\text{пред}} e $	$4,54 \cdot 10^4$	$1,28 \cdot 10^5$	$6,67 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^6$	$4,07 \cdot 10^6$

Результаты расчета роста заряженных капель, обусловленного их электрической коагуляцией

Расчеты столкновений заряженных капель и их последующего роста, обусловленного электрической коагуляцией, проведены по формуле

$$N(r_1, q_1; r_2, q_2) = E(r_1, q_1; r_2, q_2) K_t n_1(r_1, q_1) n_2(r_2, q_2) \tau, \quad (8)$$

где E — коэффициент захвата, K_t — коэффициент турбулентности (Мазин, Шметер, 1983), r и q — радиус и заряд сталкивающихся частиц, τ — время.

Отметим некоторые особенности этих расчетов. Коэффициент захвата E был взят в соответствии с табл. 2. Основным критерием выбора значения E как для разноименно, так и для одноименно заряженных капель было произведение зарядов сталкивающихся капель. Формула (8) относится только к парным столкновениям капель. Нет каких-либо реальных оснований для того, чтобы полностью исключить двойные одновременные столкновения капель и столкновения большей кратности — они просто исключены из общих соображений.

По мере того как в результате столкновений капель происходит их слияние, число еще не столкнувшихся капель уменьшается. Однако уменьшение числа сталкивающихся капель за счет уже столкнувшихся не учитывалось. Это было скомпенсировано выбором очень малого шага по времени (не более 0,5 с).

Если капля даже за указанный малый временной шаг расчета испытывала несколько столкновений, то это приводило к занижению числа столкновений. Учитывался только начальный радиус капли, который возрастал в зависимости от числа столкновений. Возможное значительное число столкновений могло изменить использовавшееся изначально значение коэффициента захвата.

В самом начале процесса столкновения капель были приняты во внимание наиболее вероятные столкновения — положительно заряженных капель с отрицательно заряженными. Число столкновений отрицательно заряженных капель с положительно заряженными каплями каждого сорта зависит от концентрации

последних. Чтобы это учесть при распределении отрицательных капель на положительно заряженные капли, находились весовые множители такого распределения. Сначала чисто формально рассчитывались столкновения полной концентрации отрицательно заряженных капель с положительно заряженными каплями каждого сорта, как если бы существовали положительно заряженные капли только такого сорта. Затем число этих столкновений суммировалось, а далее находились весовые множители как отношение числа столкновений с положительно заряженными каплями выделенного сорта к полному числу столкновений с положительно заряженными каплями всех сортов.

Из рассчитанного с весовым множителем истинного значения числа столкновений $N_{ст}$ при известной концентрации положительно заряженных капель данного сорта находилось отношение числа столкновений к концентрации положительно заряженных капель — другими словами, число отрицательно заряженных капель, попавших на одну положительно заряженную каплю. В случае когда указанное отношение оказывалось дробным, концентрация положительно заряженных капель распределялась по целому числу столкновений. Так, например, в случае более двух, но менее трех столкновений концентрация положительно заряженных капель с уменьшенным зарядом, равным двум зарядам отрицательно заряженных капель, равнялась $3n(qe^+) - N_{ст}$, а при трех столкновениях она составляла $N_{ст} - 2n(qe^+)$, где $n(qe^+)$ — первоначальная концентрация положительно заряженных капель, а $N_{ст}$ — число их столкновений с отрицательно заряженными каплями. Аналогичные соотношения легко получить и для любого дробного значения столкновений.

Процесс столкновения капель сопровождался их конденсационным ростом и уменьшением их концентрации за счет турбулентной диффузии. Принимая во внимание соотношение между интенсивностью этих процессов, как обычно принято, по методу расщепления на физические процессы для каждого промежутка времени, был, прежде всего, оценен конденсационный рост капель, затем среднее уменьшение их концентрации в начале и в конце взятого временного интервала и, наконец, электрическая коагуляция.

В нашу задачу входит только показать, что искусственные сильно заряженные капли, образовавшиеся на заряженных гигроскопических частицах, приводят даже в отрыве от неминуемого их взаимодействия с каплями естественной облачной среды к размерам капель, которые соответствуют гравитационной коагуляции и выпадению осадков.

В течение интервала 2,5—3 с произойдет столкновение капля с зарядом более $272 e^+$ и отрицательных капель с зарядом более $232 e^-$. С учетом диффузии в облачной среде сформируются положительно заряженные капли радиусом 14,6 мкм с концентрацией $2,53 \cdot 10^5 \text{ л}^{-1}$. Таким образом, после введения в облако гигроскопического заряженного реагента в облачной среде формируется система, состоящая из искусственно созданных положительно заряженных капель с зарядом 856—3880 e , радиусом 14,7 мкм, концентрацией $2,53 \cdot 10^5 \text{ л}^{-1}$ и отрицательно заряженных капель с зарядом более 332 e , радиусом 9,1 мкм, концентрацией $0,2 \cdot 10^7$, а также система облачных капель естественного происхождения радиусом, по крайней мере, не менее 10 мкм с концентрацией в несколько тысяч в литре облачной среды (Мазин, Шметер, 1983). Считается, что заряд облачных капель составляет в среднем $|q| = 10^{-4}R$, где R — радиус капли (см), а q — значение заряда в системе СГС. Следовательно, капля радиусом до 10 мкм несет заряд без указания его знака в 200 зарядов электрона. Такая система капель в облаке не может не привести к гравитационной коагуляции и выпадению осадков (Левин, Седунов, 1967). Однако для определения их интенсивности, количества, продолжительности потребуются дополнительные специальные исследования.

Выводы

1. Обоснование воздействия заряженным гигроскопическим реагентом с целью вызывания осадков проведено путем рассмотрения последовательности физических процессов, начиная от горения пиротехнического состава до формирования концентрации искусственно созданных заряженных капель, которые при их

взаимодействии с каплями естественной облачной среды приводят к гравитационной коагуляции капель в облаке и их росту до размеров капель выпадающих осадков.

2. На основе максвелловского распределения электронов по скоростям выполнен расчет числа электронов эмиссии с горячих частиц. Покинуть частицу способны лишь электроны, энергия которых превышает энергию взаимодействия их с положительным зарядом частицы. Поэтому нижняя оценка числа электронов эмиссии даже при $T = 2000$ К и при небольшом значении термоэлектронной работы выхода электронов превышает 2000 электронов с частицы радиусом $5 \cdot 10^{-5}$ см.

3. На основании известных теоретических представлений установлено, что все электроны эмиссии пошли на образование отрицательных ионов молекул кислорода, которые, захватывая несколько нейтральных молекул, превращаются в легкие ионы.

4. После прекращения эмиссии оставшиеся легкие ионы распределяются между положительно заряженными частицами после эмиссии и частицами без эмиссии пропорционально потокам на эти два вида частиц. В результате получается, что 3 % частиц имеют заряд $1900 e^+$ и 97 % частиц — заряд $63 e^-$.

5. Охлажденные гигроскопические частицы в облачной среде превращаются в положительно и отрицательно заряженные капли, инициируя их электрическую коагуляцию.

6. Выполненный предварительный расчет электрической коагуляции первоначально заряженных капель показывает, что уже через 3 с после образования заряженных капель формируется концентрация положительно заряженных капель радиусом 14,7 мкм с зарядом $\sim 3880 e$, которая равна $2,53 \cdot 10^5$ капель на литр облачной среды и концентрация $0,2 \cdot 10^7$ отрицательно заряженных капель, радиусом 9,1 мкм с зарядом более $332 e$. Взаимодействие этой системы капель с естественной системой электрически заряженных облачных капель радиусом до 10 мкм, концентрация которых составляет несколько тысяч в литре облачной среды, приводит к укрупнению капель до размеров капель выпадающих осадков. Для определения интенсивности осадков, их продолжительности и общего количества требуются отдельные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козлов В. Н., Лихачев А. В., Окунев С. М., Фомин В. А. (1997).* Пиротехнический состав для вызывания осадков. — Патент РФ. № 2090548.
- Красногорская Н. В., Неизвестный А. И. (1973).* Экспериментальное исследование эффективности столкновения и слияния заряженных капель равных размеров. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 9. № 4. С. 399—410.
- Красногорская Н. В., Неизвестный А. И. (1967).* О скорости коагуляционного роста заряженных облачных капель / В кн.: Атмосферное электричество. Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. — Л.: Гидрометеоиздат. С. 144—156.
- Левин Л. М. (1961).* Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. — М., изд. АН СССР. 266 с.
- Левин Л. М., Седунов Ю. С. (1967).* Гравитационная коагуляция заряженных облачных капель в турбулентной среде // Труды ИПГ. Вып. 9. С. 3—16.
- Мазин И. П., Шметер С. М. (1983).* Облака. Строение и физика образования. — Л.: Гидрометеоиздат. 278 с.
- Мейсон Б. Дж. (1961).* Физика облаков. — Л.: Гидрометеоиздат. 541 с.
- Месси Г. (1979).* Отрицательные ионы. — М.: Мир. 754 с.
- Мучник В. М., Фишман Б. Е. (1982).* Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. — Л.: Гидрометеоиздат. 206 с.
- Мучник В. М. (1974).* Физика грозы. — Л.: Гидрометеоиздат. 351 с.
- Стожков Ю. И., Покревский П. Е., Зулло Ж. мл. и др. (1996).* Воздействие потоков заряженных частиц на интенсивность осадков // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 36. № 4. С. 211—216.
- Шидловский А. А. (1973).* Основы пиротехники. — М.: Машиностроение. 319 с.
- Шишкин Н. С. (1964).* Облака, осадки и грозовое электричество. — Л.: Гидрометеоиздат. 401 с.
- Pruppacher H. R., Klett T. D. (1978).* Microphysics of cloud and precipitation. — D. Reidel Publish. Co. 714 p.
- Schlamp K. J., Crover S. N. and Pruppacher H. R. (1976).* A Numerical investigation of the effect of electric charges and vertical external electric fields on the collision efficiency of cloud drops // J. Atmos. Sci. V. 33. No. 9. P. 1747—1755.

УДК 551.576

**ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБРАЗЦА ДМРЛ-С
НА ВАЛДАЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ
КОЛИЧЕСТВЕННОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ
ОПРАВДЫВАЕМОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ГРОЗ НА ОСНОВЕ
СОПОСТАВЛЕНИЯ С ДАННЫМИ НАЗЕМНОЙ
НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ И СПУТНИКОВОЙ
ИНФОРМАЦИЕЙ**

*А. С. Горбатовская, Е. В. Дорофеев, И. Б. Попов,
И. А. Тарабукин*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: Ardnaxelai@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.02.2012
Поступила после доработки 29.03.2012

Введение

Начиная с 1950 г., на фоне активного развития направления радиолокационных наблюдений, возник вопрос об эффективности обнаружения опасных явлений (ОЯ) с помощью МРЛ. Эта эффективность определялась путем сравнения радиолокационной информации с данными об ОЯ из других источников, в частности с информацией, полученной с наземной наблюдательной сети. Теоретическая и практическая проработка этой задачи была осуществлена в работах сотрудников Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова Е. М. Сальмана, Г. Б. Брылева, С. Б. Гашиной и др. В настоящее время представляется актуальным вернуться к этой проблеме в связи с внедрением в сеть новых доплеровских метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С.

В 2011 г. доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С проходил опытную эксплуатацию на Валдае, в европейской части России. Полученные в летний период радиолокацион-

ные данные использовались для сопоставления с данными наземной наблюдательной сети с целью получения количественных оценок оправдываемости фиксирования грозы по радиолокационным критериям. Спутниковые данные использовались для качественной оценки наличия или отсутствия облачности.

Распознавание гроз — задача вторичной обработки принимаемой локатором первичной информации. Алгоритм этого действия, примененный в ДМРЛ-С, соответствует требованиям руководящего документа РД 52.04.320—91 «Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2 и МРЛ-5».

Этот документ разрабатывался для метеорологических радиолокаторов с длиной волны 3 и 10 см, и, следовательно, эффективность данного алгоритма для ДМРЛ-С, работающего в С-диапазоне (5,6 см), должна быть дополнительно проверена. Теоретический расчет тут вряд ли имеет смысл, так как даже для действующих долгое время на сети локаторов МРЛ-5 параметры критериев распознавания должны постоянно корректироваться с учетом местных условий. В связи с этим единственным правильным путем проверки может быть сопоставление результатов радиолокационных метеорологических наблюдений с данными наземной наблюдательной сети Росгидромета и дальнейшая корректировка алгоритмов распознавания по итогам сопоставления.

Основные принципы работы ДМРЛ-С изложены в работе Вылегжанина и др. (2009).

Для определения грозоопасности кучево-дождевого облака используется пороговый критерий Y , который связывает высоту верхней границы радиоэха и отражаемость $\lg Z_3$ на уровне H_3 , на 2—2,5 км превышающем уровень нулевой изотермы H_0 °С.

На оперативной сети грозы фиксируются, когда $Y > Y_k$, где

$$Y_k = H_{-22\text{ °С}}(\lg Z_3)_{\min},$$

$(\lg Z_3)_{\min}$ — минимальное значение $\lg Z_3$ в грозах (дБ), $H_{-22\text{ °С}}$ — высота изотермы -22 °С (км).

При этом предполагается, что для гроз с различной вероятностью выполняются следующие условия:

1) если $Y > Y_k + 14$, наблюдается гроза с вероятностью $P \geq 90$ %; обозначается $\overline{\mathbb{Q}}$;

2) если $Y > Y_k + 6$, наблюдается гроза с вероятностью $P = 70 \dots 90$ %; обозначается $\overline{\mathbb{Q}}$;

3) если $Y > Y_k$, наблюдается гроза с вероятностью $P < 70$ %; обозначается $\overline{\mathbb{Q}}$.

Методы и материалы

1. Сопоставление радиолокационной метеорологической информации с данными наземной наблюдательной сети проведено на примере грозового сезона 2011 г. (май—июль) с использованием следующих данных:

— радиолокационные данные ДМРЛ-С Валдай о грозе с разной вероятностью в синоптические сроки (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 ч);

— данные наземной наблюдательной сети Росгидромета, представленные в коде КН-01, о наличии гроз в срок в зоне обзора ДМРЛ-С Валдай.

2. Данные о грозе, полученные с наблюдательной сети Росгидромета, принимаем за истинные значения, а радиолокационные данные — за информацию, достоверность которой необходимо проверить.

3. В представленных ниже расчетах статистических характеристик в качестве пространственного допуска ОЯ — гроза, зафиксированная ДМРЛ-С, используется зона в радиусе 30 км от места расположения метеорологической станции, согласно Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам (1985).

4. Для того чтобы оценить условия обзора, в статистической оценке отдельно используются данные метеорологических станций, расположенных в ближней зоне (0—30 км), и отдельно данные метеорологических станций, расположенных в дальней зоне (30—200 км).

5. Статистические параметры обнаружения грозы оцениваются в альтернативной форме по факту наличия или отсутствия этого явления в зоне метеостанции (в радиусе 30 км от метеостанции).

6. Все статистические параметры рассчитаны для трех градаций вероятности обнаружения гроз: $\overline{\text{Г}}$, $\overline{\text{Г}}$, $(\overline{\text{Г}})$.

Для оценки гроз используются сообщения в коде КН-01.

В табл. 1 приводятся коды явлений погоды и соответствующие им характеристики.

Таблица 1

Код явления	Характеристика явления
17	В срок наблюдения, но никаких осадков на станции не выпадает
95	Гроза в срок наблюдения слабая или умеренная без града или крупы, но с дождем или снегом либо с дождем и снегом
96	Гроза в срок наблюдения слабая или умеренная с градом или крупой
97	Гроза в срок наблюдения сильная без града или крупы, но с дождем или снегом либо с дождем и снегом
98	Гроза в срок наблюдения вместе с песчаной или пыльной бурей. Осадки могут быть видны или не видны
99	Гроза в срок наблюдения сильная с градом или крупой

В качестве специального программного обеспечения (СПО) для сопоставления в ручном режиме использовался программный комплекс «Синоптик—Прогнозист».

В качестве СПО для сопоставления в автоматическом режиме использовалась программа расчета статистических параметров «Статистика».

В зону обзора ДМРЛ-С Валдай входят следующие метеостанции:

1) ближняя зона (в радиусе 0—30 км от ДМРЛ-С Валдай): Крестцы (26 285), Боровичи (26 291), Бологое (26 298), Демянск (26 381), Осташков (26 389);

Для некоторых дней или сроков отсутствуют радиолокационные данные в синоптический срок, что может быть связано с техническими неполадками или утратой данных. В результате были проанализированы радиолокационные данные для 172 случаев гроз в синоптический срок.

Технология проведения сопоставления

Достоверность данных ДМРЛ-С в настоящем случае можно определить как соответствие информации ДМРЛ-С истинному значению (т. е. данным, полученным с помощью наземной метеорологической сети). Оценка достоверности предусматривает расчет четырех статистических величин для ДМРЛ-С: оправдываемости, вероятности ложной тревоги, вероятности обнаружения гроз, вероятность необнаружения гроз. Все статистические параметры рассчитаны для ближней, дальней и всей зоны обзора ДМРЛ-С, а также для трех градаций вероятности обнаружения гроз (\overline{K} , \overline{K}), (\overline{K}) и представлены в табл. 2 и 3.

Оправдываемость и вероятность ложной тревоги ДМРЛ-С

Оправдываемость ДМРЛ-С — это отношение числа случаев гроз по данным ДМРЛ-С, совпавших со случаями гроз по данным метеостанции, к числу случаев гроз по данным ДМРЛ-С.

Статистическая оценка оправдываемости P (%) рассчитывается по формуле

$$P = \frac{n}{N} \cdot 100,$$

где n — число случаев, когда гроза, обнаруженная автоматизированным радиолокатором в срок проведения наблюдений, получила подтверждения по данным наблюдений на метеорологической станции; N — общее число случаев, когда гроза была обнаружена автоматизированным радиолокатором в срок проведения наблюдений.

Вероятность ложной тревоги ДМРЛ-С — это отношение числа случаев гроз по данным ДМРЛ-С, не совпавших с грозами, наблюдаемыми на метеостанции, к числу случаев гроз по данным ДМРЛ-С.

Таблица 2

Оправдываемость и вероятность ложной тревоги ДМРЛ-С

Характеристика	Зона обзора											
	0—200 км				0—30 км						30—200 км	
	К	К	(К)	Всего	К	К	(К)	Всего	К	К	(К)	Всего
Число гроз по ДМРЛ-С	72	31	19	122	34	9	8	51	38	22	11	71
Число гроз по ДМРЛ-С, подтвержденных метеостанцией	38	12	6	56	12	2	0	14	26	10	6	42
Число гроз по ДМРЛ-С, не подтвержденных метеостанцией	34	19	13	66	22	7	8	37	12	12	5	29
Оправдываемость ДМРЛ-С, %	53	39	32	46	35	22	0	27	68	45	55	59
Вероятность ложной тревоги ДМРЛ-С, %	47	61	68	54	65	78	100	73	32	55	45	41

Статистическая оценка вероятности ложной тревоги A (%) рассчитывается по формуле

$$A = \frac{k}{N} \cdot 100,$$

где k — число случаев, когда гроза, обнаруженная автоматизированным радиолокатором в срок проведения наблюдений, не получила подтверждения по данным наблюдений на метеорологической станции.

Оправдываемость и вероятность ложной тревоги — характеристики, учитывающие объективные обстоятельства, по которым данный ДМРЛ-С может не выявить опасные явления. К обстоятельствам, которые влияют на условия обзора, могут относиться некоторые физико-географические особенности местности, большие углы закрытия, а также необходимость корректировки критериев грозоопасности и синхронности наблюдений.

На рис. 2 представлены оправдываемость и вероятность ложной тревоги ДМРЛ-С для ближней, дальней и всей зоны обзора ДМРЛ-С.

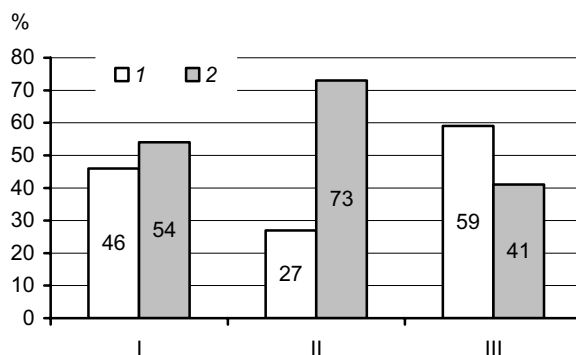


Рис. 2. Оправдываемость (1) и вероятность ложной тревоги (2) ДМРЛ-С.

I — вся зона обзора (0—200 км), II — ближняя зона (0—30 км), III — дальняя зона (30—200 км).

Из рисунка видно, что только в дальней зоне оправдываемость больше, чем вероятность ложной тревоги. В радиусе 0—200 км эти величины практически равны, а в ближней зоне вероятность ложной тревоги значительно больше, чем оправдываемость. Возможно, это связано с небольшой выборкой в ближней зоне из-за малого числа станций (пять станций).

Оправдываемость в ближней зоне (27 %) намного меньше, чем в дальней (59 %). Это обстоятельство требует дальнейшего анализа.

На рис. 3 представлена доля гроз (%) по данным ДМРЛ-С, подтвержденных и не подтвержденных данными наземной наблюдательной сети.

Из рис. 3 видно, что большая часть случаев гроз, зафиксированных ДМРЛ-С с вероятностью $\bar{\zeta} (\geq 90 \%)$ в зоне 0—200 км, подтверждается результатами наземных метеорологических наблюдений. Только в ближней зоне ситуация иная: не подтвержденных данными метеорологических станций гроз (18 %) больше, чем подтвержденных (10 %).

Самое большое значение оправдываемости (68 %) было отмечено, когда ДМРЛ-С фиксировал грозы $\bar{\zeta}$ в дальней зоне, а самое маленькое (0 %) — в ближней зоне.

Очевидно, что чем с меньшей вероятностью ДМРЛ-С фиксирует грозовой очаг, тем с меньшей вероятностью эти данные подтверждаются результатами наблюдений наземной сети. Например, из восьми случаев гроз, зарегистрированных ДМРЛ-С в ближней зоне с вероятностью $\bar{\zeta}$, ни один не подтвердился. Такая же закономерность наблюдается и для данных в дальней зоне, а также при фиксации гроз с вероятностью $\bar{\zeta}$.

Вероятность обнаружения и не обнаружения опасных явлений ДМРЛ-С

Вероятность обнаружения гроз ДМРЛ-С — это отношение числа случаев, когда грозы, зафиксированные сетью наземных метеостанций, не были обнаружены ДМРЛ-С, к общему числу гроз, зафиксированных метеостанциями.

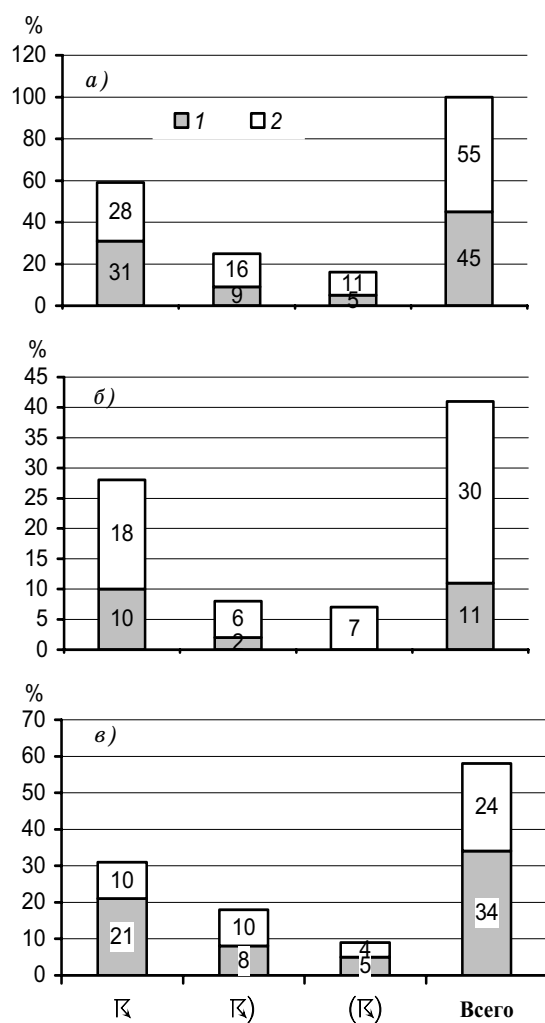


Рис. 3. Доля гроз (%), обнаруженных ДМРЛ-С, подтвержденных (1) и неподтвержденных (2) результатами наблюдений метеорологических станций.

a — во всей зоне обзора (0—200 км), *б* — в ближней зоне (0—30 км),
в — в дальней зоне (30—200 км).

Статистическая оценка вероятности обнаружения опасного явления D (%) рассчитывается по формуле

$$D = \frac{m}{M} \cdot 100,$$

где m — число случаев, когда ОЯ, зафиксированное наземной сетью метеостанций в срок проведения наблюдений, не было зафиксировано ДМРЛ-С; M — общее число случаев ОЯ, зафиксированное наземной сетью метеостанций в срок проведения наблюдений.

Вероятность необнаружения гроз ДМРЛ-С — это отношение числа случаев, когда грозы, зафиксированные сетью наземных метеостанций, не были обнаружены ДМРЛ-С, к общему числу гроз, зафиксированных метеостанциями.

Статистическая оценка вероятности необнаружения опасного явления F (%) рассчитывается по формуле

$$F = \frac{c}{M} \cdot 100,$$

где c — число случаев, при которых ОЯ, зафиксированное наземной сетью метеостанций в срок проведения наблюдений, не было обнаружено ДМРЛ-С; M — общее число случаев ОЯ, зафиксированное наземной сетью метеостанций в срок проведения наблюдений.

Вероятность обнаружения и необнаружения ОЯ — характеристики, учитывающие объективные обстоятельства обнаружения ОЯ, присущие данной местности, а также особенности радиолокационных условий наблюдений.

На рис. 4 представлено распределение доли (%) обнаруженных и не обнаруженных ДМРЛ-С гроз, которые были зафиксированы наземной сетью метеостанций в синоптические сроки наблюдений.

Из рисунка видно, что большинство гроз, зафиксированных наземной сетью метеостанций, были обнаружены ДМРЛ-С, причем в ближней зоне вероятность обнаружения гроз намного больше, чем вероятность необнаружения. В дальней зоне, так же как и по всей зоне обзора ДМРЛ-С, эти показатели примерно равны (рис. 5 и табл. 3).

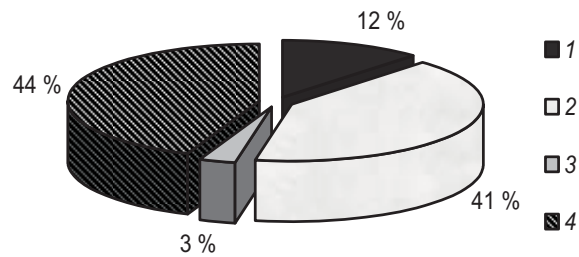


Рис. 4. Доля (%) обнаруженных и не обнаруженных ДМРЛ-С гроз, которые были зафиксированы наземной сетью метеостанций.

1 и 2 — доля обнаруженных ДМРЛ-С гроз в ближней (1) и дальней (2) зоне, 3 и 4 — доля не обнаруженных ДМРЛ-С гроз в ближней (3) и дальней (4) зоне.

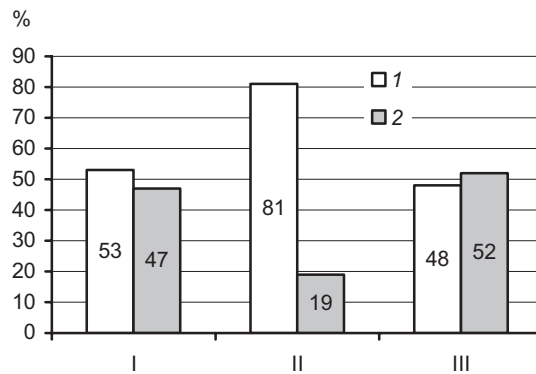


Рис. 5. Вероятность (%) обнаружения (1) и необнаружения (2) гроз ДМРЛ-С.

I — вся зона обзора (0—200 км), II — ближняя зона (0—30 км), III — дальняя зона (30—200 км).

Из рис. 6 видно, что достаточно большая доля гроз, зафиксированных наземной сетью метеостанций и подтвержденных данными ДМРЛ-С, обнаружены локатором с самой большой вероятностью 74 (68 %).

Таблица 3

Вероятность обнаружения и не обнаружения гроз ДМРЛ-С

Характеристика	Вся зона	БЗ	ДЗ
Число гроз, зафиксированных на метеостанциях	105	16	89
Число гроз по данным метеостанций, обнаруженных ДМРЛ-С	56	13	43
Число гроз по данным метеостанций, не обнаруженных ДМРЛ-С	49	3	46
Вероятность обнаружения гроз ДМРЛ-С, %	53	81	48
Вероятность необнаружения гроз ДМРЛ-С, %	47	19	52

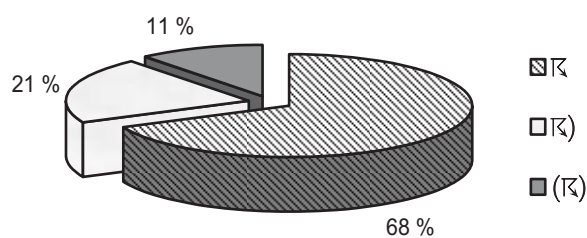


Рис. 6. Доля (%) обнаруженных ДМРЛ-С с разной вероятностью гроз, которые были зафиксированы на метеостанции (56 случаев) в зоне 0—200 км.

Основные выводы

Подход к сопоставлению радиолокационных данных с данными метеорологической наземной наблюдательной сети, который предложен в настоящей работе, носит пилотный характер. Данная работа осуществлялась для конкретного образца ДМРЛ-С, установленного на Валдае, в рамках его опытной эксплуатации. Конечная цель настоящей работы заключается в развитии автоматизированной технологии сопоставления наземных метеорологических, грозопеленгационных и радиолокационных данных с целью уточнения критериев грозоопасности. Такое сопоставление

планируется проводить в дальнейшем по мере развития сети ДМРЛ-С.

Оценив основные статистические характеристики, можно сделать следующие выводы.

1. Согласно статистическим показателям, существуют некоторые объективные обстоятельства, по которым данный ДМРЛ-С может не выявлять опасные явления в ближней зоне, и в частности:

- некоторые физико-географические особенности местности,
- особенности радиолокационных наблюдений.

Так, например, большие углы закрытия в азимуте (секторе) расположения опасного явления из-за наличия в радиусе радиолокационного обзора высоких «местников» (деревьев, зданий, сооружений и т. д.) препятствуют наблюдению позади них метеорологических объектов из точки установки антенны ДМРЛ-С.

2. Ввиду того что оправдываемость и вероятность ложной тревоги незначительно различаются по величине, необходима корректировка критериев грозоопасности.

3. Неудовлетворительные результаты по некоторым статистическим параметрам, возможно, связаны с маленькой выборкой.

4. Некоторые неудовлетворительные результаты могут быть следствием асинхронности наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Довиак Р., Зрнич Д. (1988). Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Пер. с англ. под ред. А. А. Черникова. — Л: Гидрометеоиздат. 511 с.

Ефремов В. С., Вовшин Б. М., Вылегжанин И. С., Лаврукевич В. В., Седлецкий Р. М. (2009). Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов // Журнал радиоэлектроники. № 10.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам (1985). Вып. 3. Часть 1. — Л: Гидрометеоиздат. 300 с.

Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2 и МРЛ-5 (1974). — Л: Гидрометеоиздат. 357 с.

УДК 551.576

**ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
РАЗНОРОДНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
В КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ АВИАЦИИ ВМФ КАСМЕТЕО-К**

*Е. В. Дорофеев¹, А. Е. Дроздов², И. А. Тарабукин¹,
А. Ф. Мирончук³, В. Ю. Шаромов²*

¹ Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова

² ОАО «ГНИНГИ»

³ ЗАО «НПО «Аквастанадарт»

E-mail: zao_lit@rambler.ru, tarabukin@mail.ru

Поступила в редакцию 17.02.2012

Поступила после доработки 7.03.2012

Введение

В настоящей работе представлена современная технология объединения разнородной метеорологической информации (включая радиолокационную) на единой картографической основе для решения задач диагноза и прогноза погоды при обеспечении полетов летательных аппаратов берегового и палубного базирования.

В качестве примеров используется информация, полученная в процессе проведения опытной эксплуатации изделия «Комплексная автоматизированная информационно-измерительная система гидрометеорологического обеспечения авиации ВМФ КАСМЕТЕО-К», максимально приближенная к реальным данным.

На начальном этапе разработки было принято решение о создании открытой мультиплатформенной геоинформационной среды для обработки, хранения и представления гидрометеорологи-

ческой информации, объединившей в себе и новые технические решения, и технологии, существующие в настоящее время.

Система КАСМЕТЕО-К состоит из типовых информационных систем (ИС), ориентированных на решение специализированных гидрометеорологических прикладных задач. Все ИС, входящие в систему, можно разделить на *три функциональные категории*:

— прием первичной гидрометеорологической информации («Программно-аппаратное средство» (ПАС) «Оператор Метеосвязи», «Метеоспутник», «Оператор МРЛ», Метеонаблюдатель»);

— обработка информации (ПАС «Синоптик-Прогнозист», «Синоптик-Консультант»);

— доведение информации до потребителя (ПАС «Метеоконсультант»).

В ПАС «Оператор Метеосвязи» (типичный представитель первой категории) предусмотрена возможность подключения ко всем типам линий связи, используемых в настоящее время в Росгидромете для обмена информацией.

Наиболее удобным и приемлемым является подключение к метеорологической ЦКС «MTS» или изделию «Митра» по выделенной линии связи или по локальной сети. В этом случае прием гидрометеорологической информации по TCP/IP каналу практически не ограничен техническими возможностями.

В ПАС «Оператор Метеосвязи» предусмотрена возможность приема и архивации следующей информации:

— приземной и высотной погоды в кодах КН01, КН04;

— авиационной погоды в кодах METAR, SPECI, TAF;

— информации в узлах регулярной или псевдoreгулярной сетки в кодах GRID, GRIB, BUFR;

— радиолокационной метеорологической информации в коде BUFR и RADOB;

— информации от метеорологических спутников, прошедших обработку и привязку;

— растровой гидрометеорологической продукции в виде факсимильных карт.

Кроме того, в системе предусмотрена возможность накопления и хранения в единой базе данных всей поступающей информации в виде упорядоченной структуры файлов. Формат базы открыт и является доступным для дальнейшего развития и дополнения.

ПАС «Синоптик-Прогнозист» (типовой представитель второй категории ИС, входящих в «КАСМЕТЕО-К») состоит из нескольких приложений, позволяющих просматривать и обрабатывать метеорологическую информацию в виде стандартных карт погоды, и предназначено для автоматизации оперативной работы синоптиков. С помощью локальной вычислительной сети или модемной линии ПАС «Синоптик-Прогнозист» может быть подключено к общей базе данных.

ПАС «Синоптик-Прогнозист» обеспечивает отображение информации в наглядной форме, редактирование ее, а также облегчает выполнение синоптиками задач анализа карт погоды, фронтального анализа и составления прогнозов. Полностью автоматизированы такие операции, как нанесение данных и обработка приземных и высотных карт погоды, проведение изолиний, построение карт приземного анализа погоды, высотной и относительной топографии.

ПАС «Синоптик-Прогнозист» позволяет специалисту-синоптику получать картографическую и факсимильную информацию типографского качества в режиме реального времени. Система автоматизирует трудоемкие операции, делая работу синоптиков более оперативной и творческой. Пример картографической информации, подготавливаемой ПАС «Синоптик-Прогнозист», представлен на рис. 1.

В ПАС «Синоптик-Прогнозист» предусмотрены следующие функциональные возможности:

— специализированный метеорологический редактор, интегрирующий в ручном и автоматическом режиме весь спектр информации, необходимой для построения карт опасных явлений погоды (АКП-1, АКП-2, АКП-1А, АКП-2А);

— построение карт погоды по информации в кодах GRID, GRIB и BUFR; автоматическое построение полей ветра на прогностических и фактических картах погоды в узлах регулярной сетки;

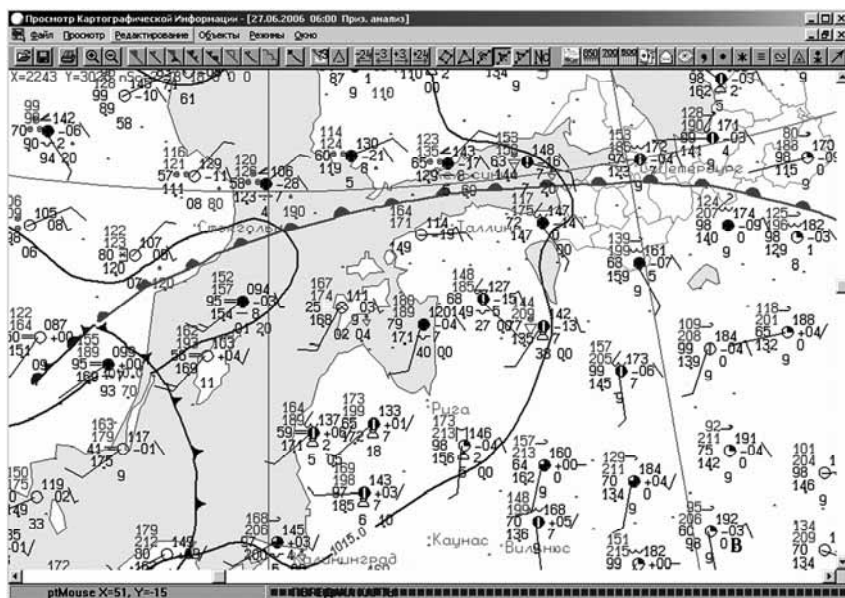


Рис. 1. Картографическая информация, получаемая на ПАС «Синоптик-Прогнозист».

- построение прогностических траекторий движения частиц воздуха с расчетом метеорологических параметров вдоль этой траектории;
- построение аэрологической диаграммы, с учетом траекторий частиц воздуха на различных высотах на основе телеграмм в коде КН04;
- ведение журнала текущей погоды по всем станциям;
- ведение журнала штормовых телеграмм с подачей звукового сигнала при приходе штормовой телеграммы.

Спутниковые данные

Если в базе данных имеется спутниковое изображение, принятое и привязанное к картографической основе, то можно провести наложение спутниковой картинки на карту погоды. Для

этого пользователю достаточно включить в таблице отображения информации пункт «Спутниковое изображение». Отображение информации вызывается с помощью пункта «Отображение информации» меню «Режим» головного меню.

Совмещение на едином информационном поле спутниковых данных и данных моделирования позволяет синоптику по новому взглянуть на фактуру облачных полей.

Пример совмещения спутникового изображения и карты приземной погоды показан на рис. 2, на котором представлены данные с метеорологических спутников, совмещенные с данными мезомасштабного моделирования по модели ММ5.

Темным цветом помечены зоны осадков, проведены изотермы и изобары.

Данные автоматизированных метеорологических локаторов

На рис. 3 представлена синоптическая карта, дополненная фронтальным анализом и данными автоматизированных метеорологических радиолокаторов. Эти данные в виде сообщений в коде BUFR получены по сети АСПД. В значительной степени эта форма представления информации ориентирована на специалиста-синоптика.

Форма представления радиолокационной информации, ориентированной на потребителя, несколько отличается от формы представления информации, подготовленной для специалиста-синоптика. На рис. 4 отображена попытка представления информации в ВЕВ-интерфейсе для ежечасной радиолокационной метеорологической карты явлений погоды для Санкт-Петербурга и Ленинградской области (<http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=573>). Эта карта строится на основе данных, полученных от автоматизированных радиолокаторов, установленных в Пулково, на Валдае, в Вантаа (05975) и Анкаланкоски (05974).

ПАС «Метеоконсультант» является специализированным рабочим местом для доведения гидрометеорологической информа-

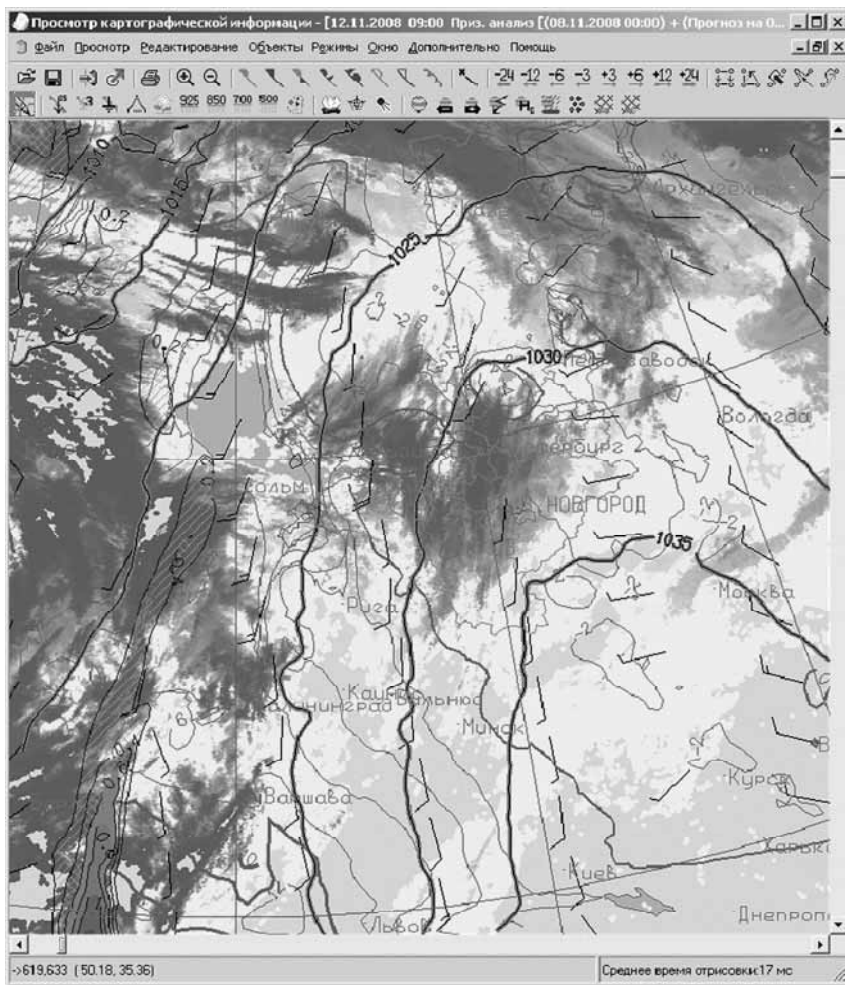


Рис. 2. Совмещение спутникового изображения и карты приземной погоды на ПАС «Синоптик-Прогнозист».

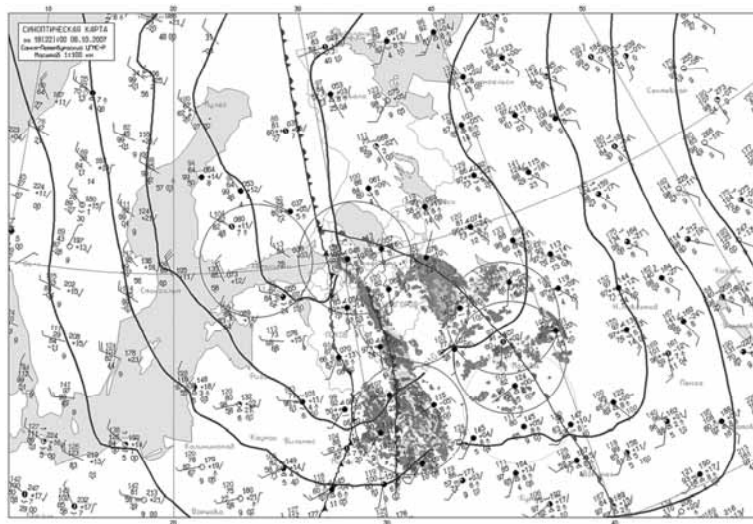


Рис. 3. Синоптическая карта, дополненная фронтальным анализом и данными автоматизированных метеорологических радиолокаторов.

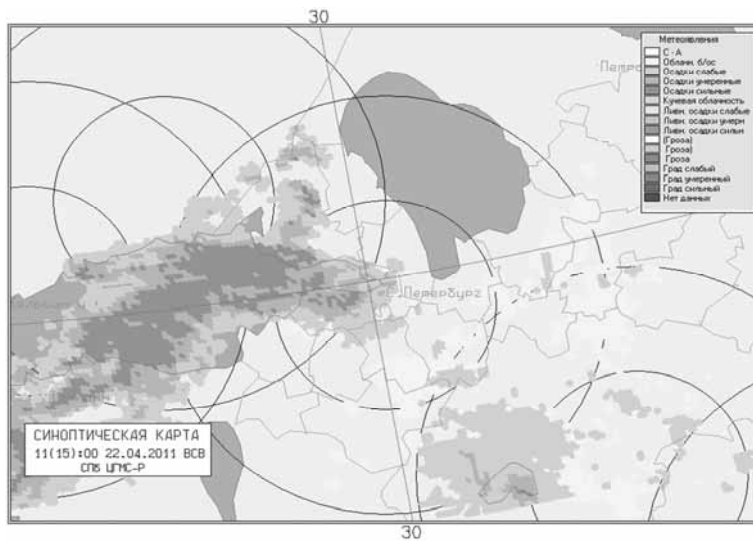


Рис. 4. Радиолокационная метеорологическая карта явлений.

ции до потребителя и максимально учитывает специфику использования этой информации при принятии хозяйственных оперативных решений. Версия, функционирующая в виде html-странички, не требует установки на компьютер специализированного ПО и является перспективным направлением развития системы КАСМЕТЕО-К.

Композитная карта метеорологических явлений погоды, связанных с радиолокационной отражаемостью, формируется на внутреннем сайте Санкт-Петербургского ЦГМС-Р Северо-Западного УГМС и используется в оперативной практике только синоптиками УГМС.

Для подготовки этой карты используются типовые приложения КАСМЕТЕО-К, запускаемые в пакетном режиме.

Эта форма представления информации допускает возможность движения по архиву, просмотра дополнительной информации и запуска режима мультфильма (рис. 5).

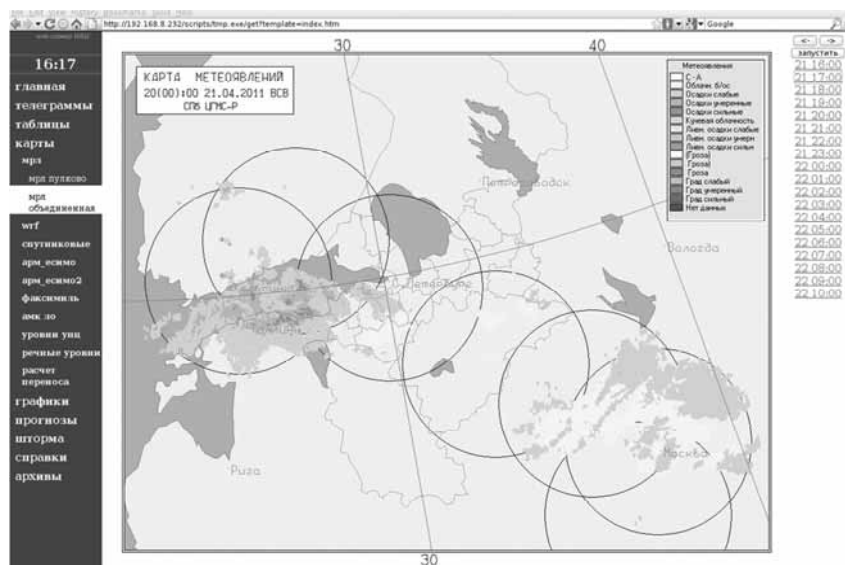


Рис. 5. Композитная карта радиометеорологических явлений погоды.

Представление данных мезомасштабного моделирования

В качестве примера удачной интеграции различных видов гидрометеорологической информации можно привести реализацию в ПАС «Синоптик-прогнозист» возможности визуализации расчетов гидродинамических моделей атмосферы.

На рис. 6 представлены данные наземной наблюдательной сети, дополненные изобарами (темно-серые кривые), и данные мезомасштабного моделирования с использования модели ММ5 (светло-серые кривые).

Сохранение прогностической и фактической информации в единой базе данных предоставляет интересную возможность сопоставления прогностических и фактических полей на общей картографической основе с учетом синоптической информации.

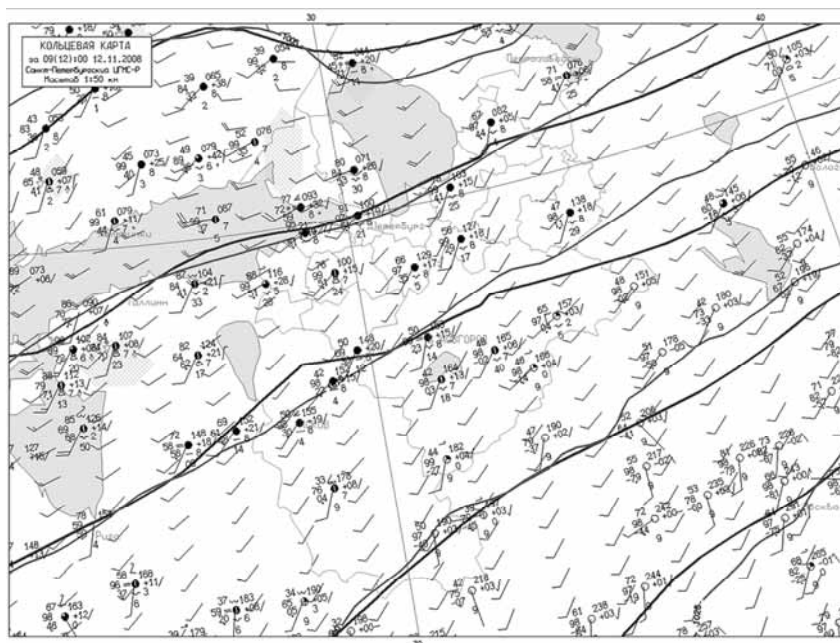


Рис. 6. Картографическое представление данных наземной наблюдательной сети.

Журнал текущей погоды

Форма представления данных наземной наблюдательной сети в виде таблицы оказалась удобной при работе оперативных синоптиков.

Журнал текущей погоды (рис. 7) позволяет отслеживать изменения погоды по нескольким станциям, выбранным синоптиками.

Журнал текущей погоды отображает данные за последние сутки. Можно добавить станцию в список отображаемых станций, воспользовавшись пунктом меню «Добавить» и введя индекс нужной станции. Для удаления станции следует подвести курсор

The screenshot shows a software window titled "Журнал Текущей Погоды - 13.11.2008 06:00, СПб ЦГМС-Р и Ленинградская область". The interface includes a menu bar with "Файл", "Список", "+3", "-3", "+24", and "-24". Below the menu is a grid of data for several weather stations. The columns represent time intervals from 09:00 to 06:00 on 13.11.2008. The rows represent different stations: 26053 С.Петербург, 26054 Озаринобухта, 22862 Выборг, 26060 Кронштадт, 26167 Николаевское, 22917 Нов./Ладоза, and 26094 Тихвин. Each cell in the grid contains a small weather icon, a cloud cover percentage, and numerical values for temperature and other parameters. A search bar at the top of the grid contains the text "СПб ЦГМС-Р и ЛЕН. ОБЛАСТЬ".

Рис. 7. Журнал текущей погоды.

мышью к изображению индекса станции и нажать правую клавишу. Пункты меню «+3», «-3», «+24» и «-24» служат для изменения срока на указанное число часов.

Выводы

1. Комплексование разнородной метеорологической информации на единой картографической основе позволяет сформировать качественно новый уровень метеорологического обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов.

2. Предварительный опыт оперативного использования компьютерных радиолокационных метеорологических карт погоды позволяет:

- оценить погрешность позиционирования радиолокаторов;
- выявить и откорректировать калибровку радиолокаторов, имеющих пересечения зон наблюдения;
- обнаружить методические ошибки в работе алгоритмов первичной и вторичной обработки радиолокационного сигнала.

3. Сохранение прогностической и фактической информации в единой базе данных и вывод их на единую картографическую основу предоставляет возможность качественного и количественного сопоставления прогностических и фактических полей с учетом синоптической информации. Это позволяет синоптику использовать скользящую статистическую оценку прогностической продукции.

4. Возможность представления информации на общей картографической основе позволяет уточнить положение фронтов в условиях недостатка данных наземных наблюдений и данных аэрологического зондирования атмосферы.

5. Совмещение данных о явлениях погоды, полученных от нескольких автоматизированных радиолокаторов, и прогностических карт высотной топографии (AT_{700} , AT_{850}) является хорошим средством для получения точечного краткосрочного прогноза погоды, удобного для принятия хозяйственных решений.

УДК 551.006.92 (47+57)

**СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
АЭРОДРОМНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

С. М. Персин¹, Л. В. Анискин¹, Д. Н. Медведев²

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

² ООО «Институт геофизического приборостроения»
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: igp@igp.spb.ru

Поступила в редакцию 3.03.2012

Измерения метеорологических параметров на аэродромах являются одним из важнейших элементов системы метеообеспечения взлета и посадки воздушных судов. В соответствии с этим предъявляются повышенные требования к объему, оперативности и достоверности получаемой в результате измерений метеоинформации, а также к используемым техническим средствам.

Основными направлениями работ по новым техническим средствам в РФ и за рубежом являются создание аэродромных измерительно-информационных систем и «интеллектуальных» датчиков нового поколения, обеспечивающих на базе встроенных микропроцессоров обработку исходной информации и формирование результирующих данных, а также повышение информационных и эксплуатационных характеристик приборов на базе новых технологий.

Требования к метеооборудованию, необходимому для обеспечения аэродромов различных категорий и классов, подробно регламентируются следующими нормативными документами: Нормами годности к эксплуатации аэродромов (НГЭА), Нормами годности к эксплуатации оборудования гражданских и воздушных трасс (НГЭО), Авиационными правилами (АП-139, АП-170), учитывающими также рекомендации ИКАО. Указанные документы определяют состав измеряемых метеорологических параметров,

требования к диапазону и погрешности измерений, обязательный (минимальный) состав метеоборудования для аэродромов всех категорий и классов, а также места его установки на аэродроме.

В соответствии с упомянутыми нормативными документами наличие в составе метеоборудования аэродрома специализированной ЭВМ, обеспечивающей автоматическое измерение, вычисление и выдачу потребителям информации, обязательно только для аэродромов II и III категории; для остальных аэродромов достаточно иметь не измерительно-информационные системы, а наборы отдельных дистанционных приборов.

Практически же требования к информации и к составу средств измерений для категорированных аэродромов и некатегорированных аэродромов классов А, Б, В совпадают. Это делает целесообразным оснащение аэродромными ИИС как минимум всех категорированных аэродромов и аэродромов классов А, Б, В, а также (в уменьшенной комплектации) аэродромов класса Г. При этом число систем, необходимое для оснащения аэродромов РФ, превышает 200.

Таким образом, аэродромные метеорологические измерительно-информационные системы (АМИИС) являются важнейшими элементами технического оснащения авиаметеосети. Использование АМИИС позволяет не только радикально повысить оперативность, достоверность, объем, объективность получаемой метеоинформации, но и значительно усовершенствовать всю технологию метеобеспечения на аэродроме по сравнению с применением автономных метеорологических приборов и устройств представления данных.

Общей тенденцией при разработке и внедрении на аэродромах АМИИС является расширение возможностей систем, круга решаемых задач, т.е. повышение уровня автоматизации метеобеспечения на аэродроме.

Прежде всего, необходимо отметить расширение возможностей метеоизмерений.

На большинстве категорированных аэродромов и аэродромов старших классов, оборудованных современными АМИИС, используются различные схемы резервирования для важнейших метеопараметров (с опросом в системе основных и резервных датчиков, диагностикой их состояния и др.).

Помимо типового (минимально необходимого) состава измерительной аппаратуры, предназначенной для оснащения аэродромов, можно указать на дополнительные датчики, служащие для повышения уровня автоматизации метеоизмерений. Такие технические средства просто ассимилируются в общую АМИИС аэродрома как дополнительные датчики и измерительные подсистемы и совместно с дополнительным программным обеспечением системы позволяют решать широкий круг задач получения и представления результирующих данных на основе комплексирования различных метеоданных.

Приведем ряд примеров, реализованных в системе АМИС-РФ.

Так, при включении в состав системы датчика погоды FD12P АМИИС предоставляет информацию не только о видимости на ВПП, но и об интенсивности и количестве осадков, а также большом числе атмосферных явлений.

Наличие в системе грозопеленгатора TSS 928 позволяет отображать (в том числе на автоматизированном рабочем месте (АРМ) синоптика) пространственно-временное распределение грозových разрядов, совмещенное с отображаемой картой местности.

Автоматическая выдача системой информации о сдвигах ветра достигается при подключении к ней дополнительного набора датчиков ветра.

Для контроля состояния ВПП (гололед и др.) используется аппаратура комплекса ROSA фирмы Vaisala, подключаемая к системе в качестве подсистемы. Результирующая информация выдается на автоматизированное рабочее место технической службы аэродрома.

Используются также датчики яркости фона, гололеда и др.

Получение дополнительной метеорологической информации достигается не только подключением дополнительных датчиков, но и посредством реализации в программном обеспечении системы новых алгоритмов (идентификация метеорологических явлений и др.), например выделение по результатам текущих учащенных измерений датчика высоты облаков слоев облачности, определение общего количества облаков и количества облаков по слоям, определение форм облаков с использованием современных цифровых телевизионных датчиков и др. Перспективным направлением является реализация в АМИИС задач сверхкратко-

срочного прогноза на базе моделей и экстраполяции текущих данных.

Важными дополнительными задачами, возлагаемыми на АМИИС, являются автоматизация режимных наблюдений и формирование климатических характеристик аэродрома.

Эта информация формируется в дополнительных АРМ на основе данных, регулярно поступающих от системы (АРМ «Климат», АРМ «Режим»).

Получение режимных характеристик выполняется на большом числе АМСГ. АМИИС позволяет автоматизировать технологию получения режимной и синоптической информации в интересах общей метеорологической сети. Включение в состав программного обеспечения АМИИС дополнительных модулей по формированию режимной информации на базе данных измерений АМИИС избавляет персонал АМСГ от трудоемкой ручной работы и повышает достоверность данных. Представляется также целесообразным подключение к АМИИС для решения указанных задач комплекта дополнительных датчиков (температуры почвы, количества и интенсивности осадков, высоты снежного покрова, продолжительности солнечного сияния). Реализация в полном объеме этой задачи обеспечивает увеличение плотности наблюдательной сети, повышает уровень ее автоматизации и дает экономический эффект благодаря использованию аэродромной ИИС для решения задач наблюдательной сети.

Получение климатических характеристик аэродрома требует формирования многолетних архивов результатов наблюдений за опасными для авиации метеорологическими явлениями и представляющими интерес для авиации метеорологическими параметрами, формирования месячных и годовых таблиц повторяемости этих параметров и явлений, их суточного и годового хода, продолжительности и других характеристик (для высоты нижней границы облаков, дальности видимости, условий погоды различной степени сложности, опасных явлений погоды, ветра и др.) (Маховер, 1983). Автоматизация позволяет резко упростить решение задач климатического описания аэродрома, повысить достоверность и объективность данных, а также возможность их наглядного представления в виде графиков, диаграмм и др.

Развитие аэродромных ИИС включает не только задачи изменений, обработки и документирования метеоданных, но и задачи, связанные с автоматизацией работы аэродрома в целом. В техническом плане сюда относятся входящие в состав ИИС коллективные и индивидуальные средства отображения, автоматизированные рабочие места (синоптика-консультанта, синоптика-прогнозиста и др.), средства сопряжения ИИС с другими системами аэродрома: АС УВД («Синтез», «Альфа», «Топаз» и др.), телекоммуникационной аппаратурой, АТИС («Попугай», «Веритек»), светосигнальными системами, аппаратурой технических служб и т. д. При этом необходимая метеоинформация поступает непосредственно на рабочие места диспетчеров.

При стыковке АМИС со светосигнальной системой аэродрома, от которой поступает информация о яркости огней (ступеней) на ВПП, включенных диспетчером УВД, полностью автоматизируется определение видимости на ВПП (RVR), а наблюдатель-оператор освобождается от необходимости ведения переговоров с диспетчером, чтобы формировать необходимую входную информацию путем ручного ввода. Это позволяет усовершенствовать технологию метеообеспечения всего аэродрома.

Следует отметить новую тенденцию в развитии возможностей АМИИС — не только метеообеспечение взлета и посадки воздушных судов в аэропорту, где установлена система, но и повышение уровня метеообеспечения других аэропортов региона, т. е. централизация метеообеспечения. Это может быть достигнуто передачей текущей метеорологической информации от аэродромов с использованием современной аппаратуры связи.

Помимо расширения возможностей аэродромных ИИС, важными тенденциями их развития являются повышение гибкости и надежности систем.

Под гибкостью ИИС понимается возможность модернизации технических средств и программного обеспечения системы для решения задач конкретных аэродромов, создание модификаций системы, в том числе для двухполосных аэродромов, аэродромов младших классов и вертодромов, т. е. адаптация системы к оборудованию и технологии метеообеспечения конкретного аэродрома. Это означает, в частности, возможность работы ИИС

практически со всеми имеющимися в РФ сертифицированными отечественными и зарубежными датчиками, а также с различными вариантами аэродромного оборудования (систем связи, АТИС и т. д.).

Гибкость АМИИС подразумевает не только возможность адаптации системы при ее развертывании под требования конкретного аэродрома, но и возможность оперативного изменения программного обеспечения, а также технических средств системы в процессе ее эксплуатации по мере уточнения этих требований.

Повышение надежности АМИИС включает не только аппаратную надежность (различные схемы резервирования датчиков и центральной системы, тестирование и т. п.), но и обеспечение достоверности, защиту информации, обеспечение большей репрезентативности измерительной информации. Это касается, в первую очередь, алгоритмов измерения и обработки данных (контроль и исключение выбросов, мажоритарные методы осреднения и т. п.).

Необходима доработка унифицированных требований к метеорологическим данным и к алгоритмам их формирования (дискретности исходных данных, осреднению и т. д.).

Важными элементами надежности системы являются также требование архивирования всей входящей (включая резервные датчики) и выдаваемой информации, а также всех действий оператора и защита архива от непредусмотренных технологией метеообеспечения его изменений.

В заключение отметим, что тенденции автоматизации метеообеспечения аэродромов и автоматизированные технологии метеообеспечения в настоящее время вызывают большой интерес за рубежом (Katajamaki, Heikkila, 2007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Katajamaki H., Heikkila K. (2007). Vaisala AviMet — weather an your service // Vaisala News, No. 174.

Маховер З. М. (1983). Методические указания по составлению климатической характеристики аэродрома. — Л.: Гидрометеоиздат. 59 с.

УДК 551.551.8; 551.556.4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫХ
ОБРАТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫБОРА
ВЕРТИКАЛЬНОЙ КООРДИНАТЫ**

В. М. Ивахов, А. В. Зинченко

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

Введение

*Типы моделей, в которых используются расчетные
траектории движений воздуха*

В литературе рассматриваются два основных типа моделей, в которых применяются расчетные траектории движений воздуха: лагранжевы модели атмосферной диффузии (Lagrangian particle dispersion models) и модели баланса массы примеси в гигантской атмосферной камере (Lagrangian box models) (Stohl, 1998).

Гигантская атмосферная камера (ГАК) может трактоваться как нижняя часть атмосферы, расположенная над определенной территорией и накапливающая примеси, поступающие с этой территории (Глаголев, 2010). В данной работе ГАК рассматривается как движущаяся часть атмосферы (лагранжев подход), куда поступают примеси с территорий, над которыми проходит ГАК. Соответственно этим задачам рассчитываются траектории двух видов: траектории элементов атмосферной турбулентности и траектории ГАК.

Элементы турбулентности представляют собой объемы воздуха, короткое время двигающиеся как целое в процессе турбулентного обмена, а затем теряющие свою индивидуальность. Турбулентные движения имеют характер случайных отклонений от среднего движения. Элементы турбулентности имеют различные линейные масштабы — от долей сантиметров до сотен метров.

Под ГАК понимается область воздуха, горизонтальный масштаб которой намного превышает указанные выше масштабы элементов турбулентности, но не превосходит масштаб воздушных масс. В рамках моделей такого типа предполагается, что изучаемые свойства атмосферы приблизительно горизонтально однородны в пределах ГАК.

Методы расчета траекторий движений воздуха

Для метода расчета турбулентной диффузии с помощью расчета случайных траекторий элементов атмосферной турбулентности в литературе используется специальная аббревиатура LPDM (Lagrangian particle dispersion models) (Stohl, 1998). Одной из численных моделей, реализующих LPDM, является программа FLEXPART (NILU). Модель движущейся гигантской атмосферной камеры часто называют моделью «воздушной посылки» (air parcel model) (Jacobson, 2005). Наиболее известные модели для расчета детерминированных траекторий реализованы в доступных через Интернет программах FLEXTRA (NILU) и HYSPLIT (NOAA).

Различают прогностические траектории, рассчитываемые по предвычисленным полям ветра, и траектории, рассчитываемые по архивным данным. По архивным данным траектории могут рассчитываться вперед или назад по времени. Особое значение при анализе данных наблюдений имеют обратные траектории. В литературе (Stohl, 1998) для обозначения таких траекторий используется специальная аббревиатура AMBT (air mass back trajectories).

Для расчета случайных траекторий воздушных частиц в модели FLEXPART используется стохастическое уравнение

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Delta t[\bar{v}(t) + \acute{v}(t)], \quad (1)$$

где X — вектор координат точки траектории; t — время; Δt — шаг по времени; $\bar{v}(t)$ — вектор скорости ветра, описывающий движения синоптического масштаба; $\acute{v}(t)$ — вектор турбулентной составляющей скорости ветра.

Значения $\bar{v}(t)$, которые описывают сглаженные поля ветра, могут быть получены из данных синоптических наблюдений и их реанализа или из данных прогностических расчетов атмосферной циркуляции. Турбулентные скорости $\dot{v}(t)$ описываются как случайный процесс с использованием генератора случайных чисел (Stohl, 1998).

В модели HYSPLIT для расчета детерминированных траекторий используется метод Эйлера—Коши численного интегрирования кинематического дифференцирования уравнения движения: на каждом шаге по времени определяют грубое приближение по скорости ветра в точке, соответствующей началу шага, а потом окончательное приближение по средней скорости ветра в начальной точке и в точке грубого приближения (NOAA). Поля ветра задаются в узлах географической сетки с шагом по времени, в процессе интегрирования они интерполируются.

Глобальными архивами данных, автоматически подключаемыми к программе HYSPLIT, являются архив NCEP/NCAR Reanalysis с пространственным шагом сетки $2,5^\circ$ и с шагом по времени 6 часов (данные с 1948 г. по текущий год) и архив GDAS с шагом 1° и 3 часа (с 2005 г. по настоящее время). По оценкам разработчиков средняя относительная случайная погрешность расчета координат точек на траектории по модели HYSPLIT составляет 15—30 % длины траектории (диапазон оценок определяется в основном подключаемым архивом) (NOAA, ARL). Примерно ту же точность расчета дает программа FLEXTRA.

Формулировка проблемы

Большое число работ посвящено изучению пространственно-временной изменчивости на основании связи между концентрацией какой-либо газовой примеси или аэрозоля и атмосферным переносом с использованием анализа обратных траекторий (Aalto et al., 2007; Robinson, 2011). Подробное описание методов траекторного анализа можно найти в работе Stohl (1998).

Целью данной работы является рассмотрение такого аспекта траекторного анализа, как определение наиболее репрезентатив-

ных обратных траекторий в зависимости от выбора высоты прибытия в пункт наблюдения. На первом шаге траекторного анализа, как правило, строятся обратные траектории, для генерации которых задаются время прибытия, координаты пункта наблюдения и вертикальная координата — высота прибытия.

Во многих работах при использовании траекторного анализа для исследований переноса примесей строились траектории для одной—трех высот. Например, в работе Eneroth et al. (2003) при исследовании влияния долгосрочного атмосферного переноса из средних широт на концентрацию углекислого газа, измеряемую на станции Цепелин (Шпицберген), отдается предпочтение основной «рабочей» высоте 1300 м (850 гПа), тогда как высоты 400 м (950 гПа) и 2300 м (750 гПа) анализируются, но не используются. В работе Toledano et al. (2008), посвященной изучению оптических свойств аэрозоля в зависимости от атмосферного переноса (в Испании), в качестве «рабочих» высот используются три высоты, соответствующие давлению 950, 850 и 700 гПа, но непонятно, почему выбраны только эти высоты, а не какие-нибудь другие. В работе польских ученых по изучению оптических свойств аэрозоля на Шпицбергене (Rozwadowska et al., 2010) анализируются траектории для трех высот: 1; 2,5; 5 км. При этом авторы уделили внимание репрезентативности траекторий, но не в зависимости от распределения траекторий по высоте, а в зависимости от расположения пункта наблюдения, сравнив траектории для точки наблюдения с траекториями для точек, сдвинутых на $2,5^\circ$ по долготе и $0,5^\circ$ по широте. Во многих работах (Глаголев, 2012; Katsoulis, 1992) обоснованием выбора вертикальной координаты стали субъективные суждения авторов или обоснование вовсе отсутствует.

Методы

В данной работе предлагается метод расчета обратных траекторий, репрезентативных для описания переноса примесей на расстояния порядка тысяч километров. Основные этапы расчеты следующие:

- 1) расчет серии траекторий для одного и того же времени прибытия с разными исходными высотами, равномерно распределенными по высоте с некоторым шагом;
- 2) оценка различий построенных траекторий;
- 3) проведение кластерного анализа с целью выделения наиболее репрезентативных обратных траекторий (средних траекторий кластеров);
- 4) присвоение весов средним траекториям в зависимости от числа траекторий в кластере.

Обратные траектории

В данном исследовании использовались трехдневные обратные траектории, которые состоят из 72 точек (элементов) с расчетными координатами и часовым разрешением по времени.

Для генерации обратных траекторий применялась модель HYSPLIT в режиме *off-line*. В качестве метеорологических полей, по которым производился модельный расчет траекторий, использовались данные реанализа NOAA с разрешением $2,5^\circ$ по широте и долготе, 6 часов по времени, 17 уровней по вертикали. При этом для горизонтальной и вертикальной интерполяции использовались линейная и квадратическая зависимости соответственно (Draxler, Hess, 2004). Подробное описание массива данных о метеорологических параметрах, использованного в модели при расчетах, можно найти в Интернете по адресу: URL: http://www.ready.noaa.gov/gbl_reanalysis.php.

Задание высоты прибытия обратных траекторий

Для каждого момента времени рассчитывалось десять траекторий на разных высотах: от 50 до 500 м с шагом 50 м. При выборе верхней границы исходили из того, что высота 500 м приблизительно равна среднегодовому значению высоты слоя перемешивания для 60° с. ш.

Оценка различия траекторий

Траектории, построенные для указанных высот, могут сильно отличаться друг от друга в горизонтальной плоскости (см. рис. 4).

В качестве меры различия между траекториями был выбран такой параметр, как максимальное расстояние между соответствующими элементами любых двух траекторий S_{\max} :

$$S_{\max} = \max |x_i^n x_j^n|, \quad (2)$$

$$\forall i, j: i = 1, 2, \dots, 10 \cup i \neq j \cup j = i + 1, i + 2, \dots, 10;$$

i, j — номера траекторий для одного случая; n — номер элемента траектории.

Расстояние между двумя точками вычислялось при помощи функции вычислительного пакета MATLAB («Mathworks», США) *distance*. Полученная величина выражалась в градусах, соответствующих дуге большой окружности земного шара. В отличие от абсолютного горизонтального отклонения переноса АНТД (Stohl, Wotawa, 1995) — среднего расстояния между траекториями в евклидовой метрике — параметр S_{\max} позволяет учесть различие между траекториями за все моменты времени (по всей длине траектории). Использование максимального расстояния S_{\max} вместо АНТД обусловлено неравномерным распределением элементов траекторий на плоскости, вследствие которого одни и те же значения АНТД могут соответствовать сильно различающимся кривым, совпадающим большую часть времени и сильно расходящимся в течение нескольких часов. В случае если максимальное расстояние не превышает установленное пороговое значение $2,5^\circ$ (разрешение использованных при расчете метеополей реанализа), все обратные траектории описывают очень схожий перенос. Поэтому все обратные траектории можно заменить одной средней траекторией высотой 275 м.

Кластерный анализ

В том случае, если S_{\max} превышает $2,5^\circ$, следует проводить кластерный анализ обратных траекторий, который используется для объединения кривых в группы схожих траекторий. На выходе кластерного анализа получают несколько групп, для которых рассчитываются средние траектории, характеризующее весь кла-

стер (Toledano et al., 2008). Такой процесс кластеризации называется восходящей иерархической классификацией (Чавро, Дымников, 2000). В начале процесса число кластеров равно числу траекторий; на каждом последующем шаге кластеров становится на один меньше. Алгоритм, позволяющий определить, какие траектории объединить в кластер на каждом шаге, схож с алгоритмом, использованном в работе Draxler (2009), но расстояние между элементами траекторий рассчитывается с помощью упомянутой выше функции *distance*. Можно выделить следующие этапы при проведении кластерного анализа.

- Расчет общей пространственной изменчивости TSV (total spatial variance) для каждой пары кластеров. Под TSV следует понимать меру различия между всеми траекториями кластера:

$$\text{TSV}_{i,j} = \sum_{t=1}^{t=N_t} \sum_{l=1}^{l=N_l} (x_{t,l}^{i,j} - d_l^{i,j}), \quad (3)$$

где i, j — номера кластеров, $\text{TSV}_{i,j}$ — общая пространственная изменчивость i, j -го кластера, t — номер траектории в кластере, N_t — число траекторий в кластере, l — номер элемента траектории, N_l — число элементов в траектории, $x_{t,l}^{i,j}$ — l -й элемент t -й траектории в i, j -м кластере, $d_l^{i,j}$ — l -й элемент средней траектории i, j -ого кластера.

TSV измеряется в градусах (так же как и S_{\max}). Общая пространственная изменчивость рассчитывается для каждой возможной пары кластеров. На первой итерации число кластеров совпадает с числом траекторий, и в кластер объединяется та пара траекторий, TSV которой минимальна. Число кластеров становится на единицу меньше. На второй итерации вновь перебираются все возможные пары кластеров. При этом в сочетаниях единичных траекторий с кластером, состоящем из двух траекторий, TSV рассчитывается для трех траекторий и т. д.

- Определение наименьшего приращения общей пространственной изменчивости δTSV :

$$\delta TSV_k = \min_{i,j} \left(\frac{|\text{TSV}_{k-1} - \text{TSV}_k^{i,j}|}{\text{TSV}_k^{i,j}} \right), \quad (4)$$

$$\delta TSV_k = \min_{i,j}(\text{TSV}), \quad k = 1, \quad (5)$$

где k — номер итерации; δTSV_k — приращение TSV, рассчитываемое на k -й итерации; $\text{TSV}_k^{i,j}$ — общая пространственная изменчивость, рассчитываемая на k -й итерации для i,j -го кластера.

На данном этапе определяется тот кластер, для которого изменение TSV на данной итерации относительно предыдущей стало минимальным. В качестве начального берется минимальное значение TSV, полученное на этапе формирования первого кластера, состоящего из двух траекторий.

- Объединение в общий кластер траекторий, соответствующих кластерам, для которых было получено минимальное приращение δTSV .

Присвоение весов

После того как были получены средние траектории, описывающие перенос для данного момента времени, появляется неопределенность: какая средняя траектория наиболее значима? В данной ситуации предлагается присваивать траекториям веса в зависимости от числа траекторий в кластере и различия между высотой слоя перемешивания и высотой средней траектории.

Средней кластерной траектории может быть присвоен вес в зависимости от числа траекторий в кластере как отношение этого числа к общему числу траекторий за данный момент времени:

$$w_i^n = \frac{n_i}{N}, \quad (6)$$

где w_i^n — вес средней траектории i -го кластера в зависимости от числа траекторий в кластере, i — номер кластера, n — число траекторий в кластере, N — общее число траекторий за данный момент времени.

Результаты

Вышеизложенный метод был применен для 1459 случаев за 2010 г. (шаг по времени между случаями 6 часов). При помощи модели HYSPLIT было рассчитано 14 289 обратных трехдневных траекторий для точки с координатами $59^{\circ}57'$ с.ш., $30^{\circ}42'$ в.д. (экспериментальная база Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова). Для проведения кластерного анализа и оценки S_{\max} была написана программа на языке Matlab. Только в 160 случаях (11 %) все траектории можно было заменить одной. В остальных 89 % случаев вследствие высоких значений TSV потребовалось проведение кластерного анализа.

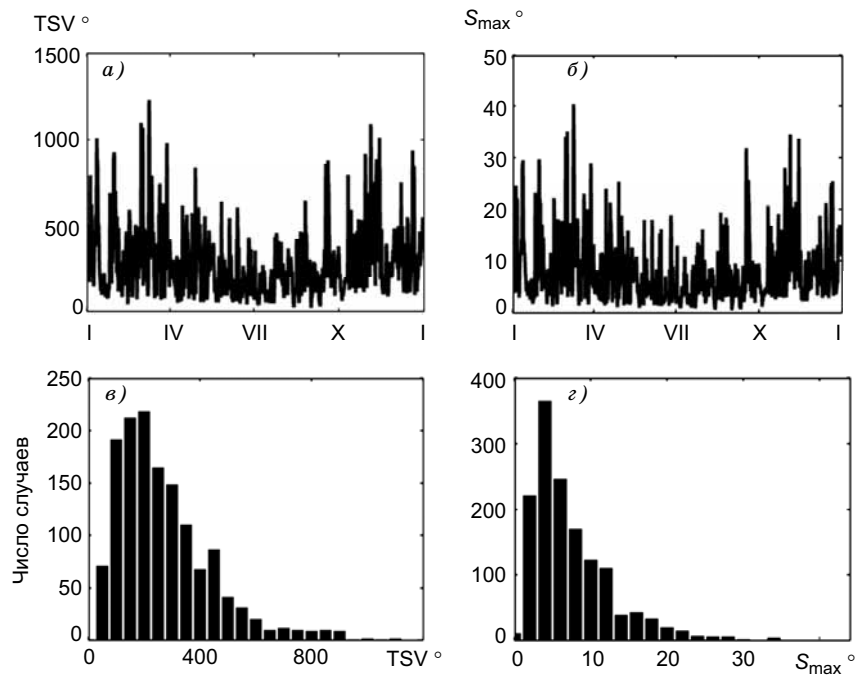


Рис. 1. Временной ход за 2010 г. общей пространственной изменчивости (а) и максимального расстояния между соответствующими элементами двух траекторий одной серии (б), а также распределение числа случаев с различными TSV (в) и с различным расстоянием S_{\max} (г).

В качестве приближения TSV было взято максимальное значение для двух траекторий одной серии. Коэффициент корреляции между расстоянием S_{\max} и TSV составил 0,94. Вероятно, параметр S_{\max} можно использовать как меру различия между траекториями в кластерном анализе.

Распределение траекторий в горизонтальной плоскости, как правило, напоминает по форме криволинейный сектор (см. рис. 4). Поэтому величина S_{\max} соответствует расстоянию между последними элементами двух крайних траекторий и показывает, как сильно расходятся траектории. На рис. 2 представлено распределение числа случаев с различными S_{\max} в зависимости от сезона. Можно отметить, что явный сезонный ход не прослеживается. Среднее значение максимального расстояния составляет $7,7^\circ$, что соответствует приблизительно 850 км.

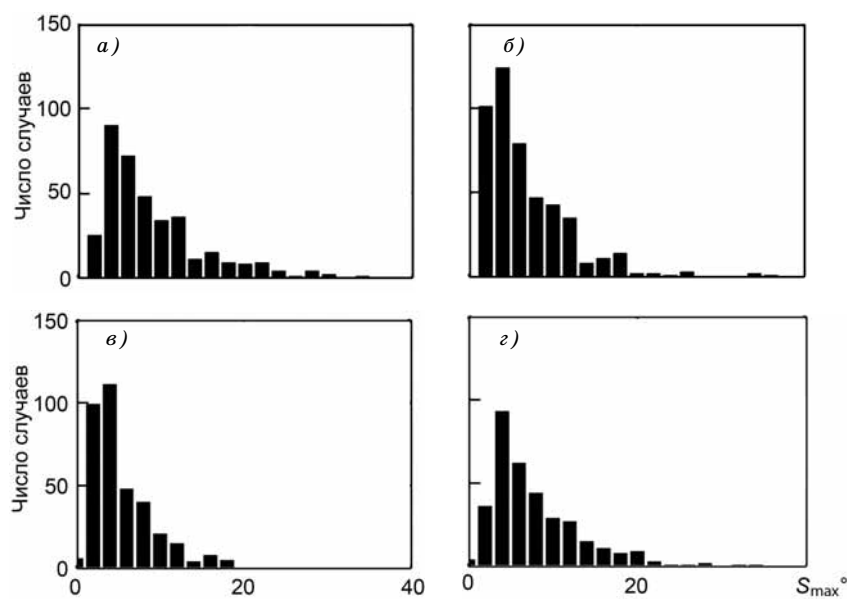


Рис. 2. Распределение числа случаев с различными значениями расстояния S_{\max} в зависимости от сезона.

а — зима, *б* — весна, *в* — лето, *з* — осень.

Кластерный анализ проводился для 89 % рассматриваемых случаев для четырех пороговых значений минимального приращения общей пространственной изменчивости: 20, 30, 40 и 50 % (рис. 3). Из рисунка видно, что увеличение δTSV приводит к уменьшению числа случаев с четырьмя средними траекториями (кластерами) от 732 при $\delta TSV = 20\%$ до 248 при $\delta TSV = 50\%$, в то время как число случаев с двумя кластерами увеличивается почти в три раза: от 217 до 646 (для тех же значений δTSV). Выбор порогового значения δTSV является субъективным и зависит от целей решаемой задачи.

Примеры возможного распределения траекторий одной серии и полученные для этих серий средние кластерные траектории представлены на рис. 4. Для случая с минимальным за год TSV (31 августа 2010 г., 18:00 UTC) траектории на всех высотах почти совпали, при этом высота слоя перемешивания составила 392 м.

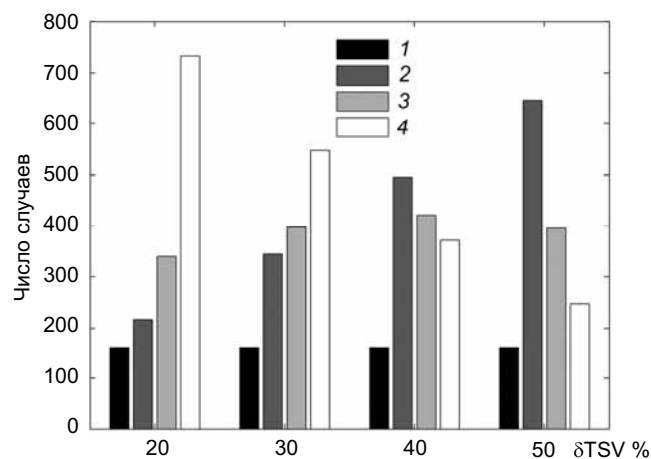


Рис. 3. Распределение случаев с различным числом кластеров в зависимости от порогового значения изменения TSV.

1, 2, 3 и 4 — один, два, три и четыре кластера соответственно.

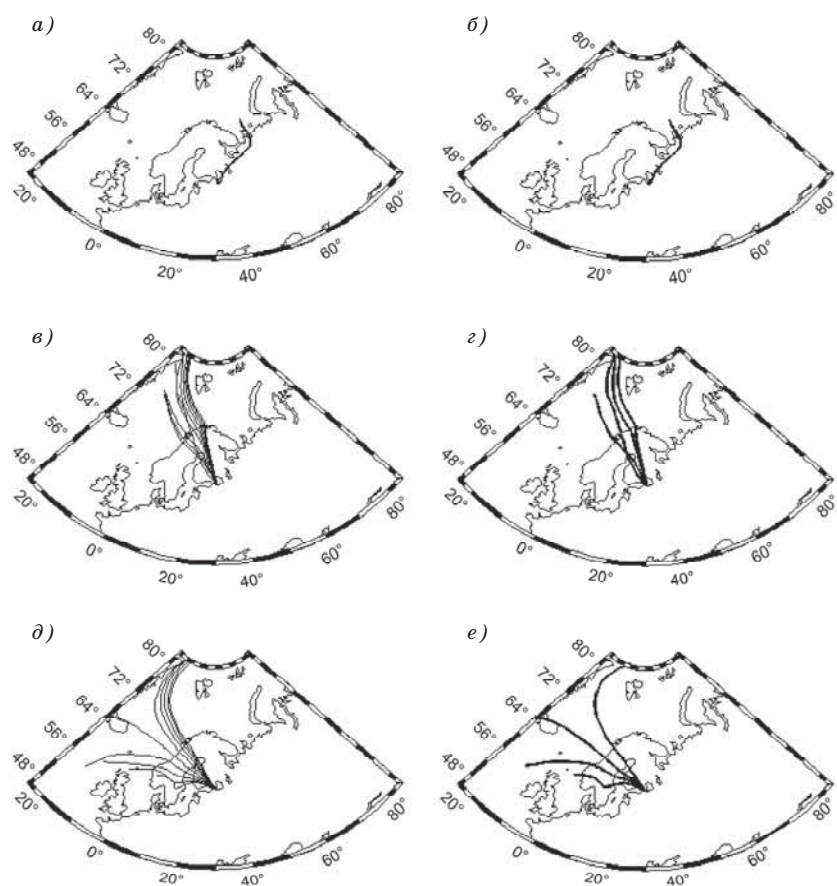


Рис. 4. Примеры распределения траекторий одной серии и соответствующие им средние кластерные $\delta TSV = 30\%$.

a, в и д — распределение траекторий при минимальном (*a*), среднем (*в*) и максимальном (*д*) TSV соответственно; *б, г и е* — средние траектории для соответствующих распределений.

В случае же с максимальным за год TSV (9 марта 2010 г., 12:00 UTC) расхождение самых удаленных соответствующих элементов траекторий составило 4448 км.

Заключение

В настоящей работе сформулирован метод расчета репрезентативных траекторий с использованием равномерно распределенных по высоте траекторий. Предложенный метод подразумевает статистический анализ набора траекторий, который включает в себя расчет максимального расстояния между двумя соответствующими элементами двух траекторий S_{\max} с целью определить, возможна ли замена всего набора одной траекторией, и кластерный анализ, который позволяет выделить наиболее репрезентативные траектории из набора на основании анализа общей пространственной изменчивости TSV.

Проведенные расчеты для 1459 случаев за 2010 г. для п. Воейково с применением данного подхода показали, что максимальное расхождение между траекториями одного набора, построенными для высот 50—500 м с шагом 50 м, составляет 4448 км. Среднегодовое значение S_{\max} не имеет ярко выраженного сезонного хода и составляет 850 км.

На основе кластерного анализа для каждого набора из десяти траекторий были получены четыре, три или две наиболее репрезентативные траектории. Число средних кластерных траекторий определяется на основе анализа минимального приращения общей пространственной изменчивости δ TSV. В случае если параметр S_{\max} не превосходит $2,5^\circ$, все траектории заменяются одной, соответствующей средней высоте 275 м. Для дальнейшего использования полученных траекторий предлагается использовать веса, учитывающие число траекторий в кластере и различие между высотой средней кластерной траектории и высотой слоя перемешивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Глаголев М. В. (2010). К методу «обратной задачи» для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 1, № 1. С. 17—36.

URL: http://www.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2010_1/documents/Glagolev.pdf

Глаголев М. В., Сабреков А. Ф. (2012). Идентификация газообмена на границе экосистема/атмосфера: метод обратной задачи // Математическая биология и биоинформатика. Т. 7, № 1. С. 81—101.

Чапро А. И., Дымников В. П. (2000). Методы математической статистики в задачах физики атмосферы / Курс лекций. — М.: ИВМ РАН, 210 с.

Aalto T., Hatakka J., Lallo M. (2007). Tropospheric methane in northern Finland: seasonal variations, transport patterns and correlations with other trace gases // *Tellus*. 59B. P. 251—259.

Draxler R. R., Hess G. D. (2004). NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224. Description of the HYSPLIT_4 MODELING SYSTEM.

Draxler R., Stunder B., Rolph G., Stein A., Taylor A. (2009). HYSPLIT4 User's Guide.

Eneroth K., Kjellstrom E., Holmen K. (2003). A trajectory climatology for Svalbard; investigating how atmospheric flow patterns influence observed tracer concentrations // *Physics and Chemistry of the Earth*, 28. P. 1191—1203.

Jacobson M. Z. (2005). Fundamentals of atmospheric modeling. 2nd ed. — Cambridge University Press. 813 p.

Katsoulis B. D., Whelpdale D. M. (1993). A climatological analysis of four-day back trajectories from Aliartos, Greece // *Theor. Appl. Climatol.*, 47. P. 93—103.

NILU, FLEXPTRA, FLEXPART URL: <http://transport.nilu.no>.

NOAA, HYSPLIT URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

NOAA, Global Reanalysis URL: http://www.ready.noaa.gov/gbl_reanalysis.php.

Qu W. J., Zhang X. Y., Arimoto R., Wang D., Wang Y. Q., Yan L. W., Li Y. (2008). Chemical composition of the background aerosol at two sites in southwestern and northwestern China: potential influences of regional transport // *Tellus*. 60B. P. 657—673.

Robinson N. H., Newton H. M., Allan J. D., Irwin M., Hamilton J. F., Flynn M., Bower K. N., Williams P. I., Mills G., Reeves C. E., McFiggans G., Coe H. (2011). Source attribution of Bornean air masses by back trajectory analysis during the OP3 project // *Atmos. Chem. Phys.*, 11. P. 9605—9630.

Rozwadowska A., Ziełiński T., Petelski T., Sobolewski P. (2010). Cluster analysis of the impact of air back-trajectories on aerosol optical properties at Hornsund, Spitsbergen // *Atmos. Chem. Phys.*, 10. P. 877—893.

Siefert R. L., Johansen A. M., Hoffmann M. R. (1999). Chemical characterization of ambient aerosol collected during the southwest monsoon and intermonsoon seasons over the Arabian Sea: Labile — Fe (II) and other trace metals // *J. Geophys. Res.* V. 104, D3. P. 19,337—19,342.

Stohl A. (1998). Computation, accuracy and applications of trajectories — a review and bibliography // Atmos. Environ., 32. P. 947—966.

Stohl A., Wotawa G. (1995). A method for computing single trajectories representing boundary layer transport // Atmos. Environ., 29. P. 3235—3238.

Toledano C., Cachorro V. E., De Frutos A. M., Torres B., Berjyn A. (2008). Airmass classification and analysis of aerosol types at El Arenosillo (Spain) // J. Appl. Met. Clim., 48. P. 962—981.

УДК 551.508:551.585

О РАСЧЕТЕ НАГРУЗОК ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА НА ТЕХНИКУ

Б. Л. Кожевников

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

Поступила в редакцию 17.11.2011

По мнению большинства исследователей, занимающихся вопросами агрессивного воздействия атмосферных условий на технику, температуру воздуха следует отнести к основным негативным воздействующим климатическим факторам (ВКФ) внешней среды (Беер, 1966; ГОСТ 26883, 1986; Смит, 1978; Сергеева, 2007). В СНиП-23-0199 «Строительная климатология» территория России и стран СНГ разделена на зоны и подрайоны по температуре и относительной влажности воздуха в сочетании со скоростью ветра (Руководство, 2008). Разработчики стандарта Климат СССР для технических целей в п. 1.3 ГОСТ 16350 (1981) также указали, что «В качестве основных климатических факторов при районировании территории СССР ... были приняты температура и относительная влажность воздуха».

Известный исследователь П. И. Кох (Кох, 1981) обобщил мнения многочисленных экспертов о влиянии на технические изделия различных ВКФ, в частности температуры. На его диаграмме отношение рангов среднего значения средних максимальных температур воздуха за три наиболее холодных месяца к среднему значению абсолютного максимума за три наиболее теплых месяца составляло 85/79, или 10/9. Это «отношение Коха» можно считать подтвержденным практикой эффектом от усилий разработчиков технических изделий в деле защиты последних от температурных воздействий.

Представляет интерес сравнить «отношение Коха» с результатами расчетов нагрузок от экстремальных температурных ВКФ, выполненных с использованием энтропийной методологии, предложенной Б. Л. Кожевниковым (2010а).

Из-за относительной природы величин термодинамической и информационных энтропий исходным условием применения «линейного метода» расчета является выбор исходной знакоразделительной точки шкалы оценок. Ранее (Кожевников, 2010а, 2010б) в качестве такой «точки» для техники была выбрана температура воздушной среды в так называемых *нормальных условиях*. *Нормальное значение* температуры воздуха было определено еще в 1959 г. государственным стандартом ГОСТ 9249. Позже параметры *нормальных условий* были уточнены п.3.15 ГОСТ 15150, а в специальном отношении — ГОСТ 8.395. В настоящее время разработчики обычно ограничивают интервал *нормальных значений* температуры окружающего воздуха пределами 20—25 °С с условным средним 22,5 °С.

Другим важным исходным моментом применения «линейного метода» расчета является выбор модели, т. е. объекта исследования. При построении энтропийной методологии в качестве такого объекта был использован образец воздуха.

Такой образец может быть получен искусственно путем смешения промышленно изготовленных газов, как это делается, например, для продувки трактов газоанализаторов. В то же время, образец может представлять собой пробу атмосферного воздуха. Состав и параметры образцов могут быть определены с помощью комплекса средств измерений, отвечающих требованиям метрологии. Оценка качества атмосферы как естественной природной среды может быть сделана методами квалитологии.

В соответствии со взглядами Л. Бриллюэна о неэнтропии (Бриллюэн, 1960) полезные свойства изделия как искусственного материального объекта определяются так называемыми «связанной» энергией и «связанной» информацией, помещенными в его структуру при изготовлении. Под действием процессов старения и износа, усиливаемых ВКФ, упорядоченность структуры изделия нарушается, «связанная» энергия и «связанная» информация утрачиваются, качество изделия ухудшается.

Аналогичное явление наблюдается, естественно, и в выбранном образце. В исходном состоянии в *нормальных условиях* воздух образца близок по свойствам к идеальному газу. В соответствии с кинетической теорией идеальных газов единственной энергией, присущей образцу в этом состоянии, является кинетическая энергия движения его частиц. Именно она может рассматриваться как «связанная энергия». В этом случае устойчивой определенностью, которой обладает образец, является так называемая «кривая Максвелла», отображающая плотность распределения вероятности (ПРВ) скоростей движения его молекул. Эта кривая и может рассматриваться в качестве «связанной информации».

В соответствии с кинетической теорией воздух образца находится в равновесии, т. е. в стационарном состоянии: столкновения его частиц во времени остаются без последствий, их состояния взаимозаменяемы. В этом состоянии, согласно информационной теории измерений (ИТИ) П. В. Новицкого (Новицкий, 1968), любая кривая ПРВ, в частности кривая Максвелла, может быть заменена на прямоугольник (эквивалентный ей по энтропии) равномерного закона. Естественно, *нормальным условиям* отвечает «своя» кривая Максвелла определенного вида и соответствующий ей прямоугольник энтропийного замещения. Со временем под действием ВКФ, например в виде отклонений температуры воздуха, в образце может быть обнаружена частица с пониженными или повышенными скоростью и энергией, значение которой выходит за границы (квантили) кривой *нормальных условий*.

На момент обнаружения аномалии ее причина неизвестна, как неизвестен и складывающийся новый вид кривой ПРВ. В этом случае, согласно ИТИ, предполагается равная вероятность появления любого значения измеряемой величины: от исходного до обнаруженного, т. е. на момент обнаружения аномалии новая кривая ПРВ имеет вид протяженного прямоугольника. Если предположить, что первый исходный прямоугольник замещения ПРВ Максвелла в *нормальных условиях* отображает некий полезный информационный сигнал, то второй прямоугольник отображает этот же сигнал, но в условиях действия информацион-

ной помехи, т. е. шума в виде ВКФ. Тогда в соответствии с 16-й теоремой Шеннона информационная энтропия определяется функционалом

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx,$$

а количество информации — разностью энтропий:

$$q = H(X/X_n) - H(X),$$

где X и X_n — непрерывная случайная величина и ее условное значение; $H(X)$ и $H(X/X_n)$ — «энтропия» и «условная энтропия» непрерывной случайной величины X .

При равномерных законах ПРВ справедливы соотношения

$$H(X/X_n) = \ln \Delta_n; \quad H(X) = \ln X - X_n,$$

где $H(X/X_n)$ — «условная энтропия» в интервале неопределенности Δ_n вокруг *нормального значения* параметра X_n , $H(X)$ — «энтропия» текущей непрерывной случайной величины X в условиях шума.

В этом случае количество утрачиваемой (знак минус) из-за воздействия ВКФ информации (q) будет представлено логарифмом:

$$-q = |\ln \Delta_n / (X - X_n)| = \ln N,$$

где N — число эквивалентных делений, равных интервалу неопределенности вокруг *нормального значения* параметра X_n и отсчитываемых от этой знакоразделительной отметки шкалы.

Вводя координату времени с дискретностью в единицу ($\Delta\tau = 1$ с), для скорости производства информационной энтропии ($\partial\Delta H/\partial\tau$), измеряемой (на физическом уровне) в битах в секунду (бит/с, или bps (bits per second)), можем записать:

$$\Delta H/\partial\tau = (-q)' = (k \ln N) / \Delta\tau, \quad (1)$$

где ΔH — информационная энтропия; k — модуль перевода единиц, равный $k = 1/\ln 2 = 1,4427$ бит/нит.

Интегрирование скорости производства энтропии по времени, определяемой выражением (1), позволяет получить значение второго энтропийного показателя, которым является количество произведенного ВКФ информационного шума, т. е. дезинформации ($-Q$) за выбранный период времени (в битах):

$$-Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (-q)' d\tau,$$

или

$$-Q = \sum_{i=1}^n (-q_j)' \Delta\tau = [(-q_{cp})]' \tau, \quad (2)$$

где $\tau = \tau_2 - \tau_1$ — выбранный интервал интегрирования (суммирования).

Следует отметить, что при проведенном построении в качестве случайных величин рассматривались скорость движения частиц и их кинетическая энергия, т. е. величины, характерные для микроуровня. При переходе на макроуровень согласно кинетической теории газов, эти величины проявляются в виде температуры и давления газа, ибо:

— абсолютная температура идеального газа является мерой кинетической энергии движения его частиц и прямо пропорциональна ей;

— давление газа численно равно двум третям суммы кинетической энергии поступательного движения молекул в данном объеме.

На этом основании при исследованиях действия температуры и давления воздуха как ВКФ нет необходимости изучать эффекты на микроуровне, а достаточно оценивать их по проявлениям на макроуровне, т. е. в нашем случае оценивать их по отклонениям параметров воздуха за пределы *интервалов нормальных значений*.

В вышеупомянутом отношении Коха использованы полученные экспертами оценки влияния на технику экстремальных температур воздуха, которые, как следует ожидать, наиболее ярко

должны проявиться при сравнении метеоданных альтернативных пунктов наблюдений контрастных климатических районов.

В ГОСТ 16350 отсутствуют данные о среднем значении средних минимальных температур воздуха за три наиболее холодных месяца, с помощью которого был определен знаменатель отношения Коха. Однако в табл. 10 этого Стандарта приведена средняя суточная температура воздуха самой холодной декады, которую вполне можно использовать для задуманного сравнения (Кожевников, 2010а). Ее значение для Оймякона (экстремального пункта *очень холодного* климатического района) равно $-54,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Самая низкая температура воздуха, приведенная в ГОСТ 25650 для Антарктиды, составляет $-88,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. В связи с этим шкала отрицательных отклонений температуры воздуха начинается от интервала *нормальных условий* ($20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$), заканчивается отметкой $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и содержит 23 деления. Значение $-54,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ находится в 16-м делении шкалы, т. е. в выражении (1) $N = 16$. Угловой коэффициент линейной зависимости в поддиапазоне отрицательных отклонений равен $0,042\text{ bps/K}$, и для $N = 16$ скорость производства информационной энтропии составляет $3,05\text{ bps}$, или $10,98\text{ кбит/ч}$. Тогда за самую холодную декаду длительностью 2192 часа нагрузка от низких температур в Оймяконе может быть оценена примерно в 24 Мбит.

Числитель отношения Коха представляет собой среднее значение абсолютного максимума за три наиболее теплых месяца. В ГОСТ 16350 подобные значения также отсутствуют, но в табл. 6 Стандарта приведены годовые максимумы температуры воздуха самой жаркой декады, которые вполне могут быть использованы для намеченного расчета (Кожевников, 2010а). Для Термеза, альтернативного Оймякону пункта наблюдений *очень жаркого* климатического района, при вероятности $0,05$ значение максимума равно $49\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при вероятности $0,1$ составляет $48\text{ }^{\circ}\text{C}$. По шкале положительных отклонений температуры воздуха от $20\text{--}25$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ промежуточное значение минус $48,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ находится в 6-м делении шкалы. Тогда из выражения (1) для $N = 6$ скорость производства информационной энтропии составляет $(-q)' = 2,58\text{ bps}$, или $9,31\text{ кбит/ч}$. Следовательно, за самую жаркую декаду дли-

тельностью 2192 часа нагрузка от высоких температур в Термезе может быть оценена примерно в 20 Мбит.

В результате отношение двух оценок приведенных расчетных нагрузок от экстремальных температур в альтернативных пунктах контрастных климатических районов составляет 24/20, или примерно 10/8. Принимая во внимание общий характер оценок П. И. Коха, сделанных для различных видов техники, а также использование в вышеприведенных расчетах статистических характеристик, отличных от тех, которые применял Кох, полученное «энтропийное соотношение» вполне соответствует отношению Коха 10/9.

Таким образом, непротиворечивость результатов расчетов воздействия экстремальных температур воздуха на технические изделия и оценок, сделанных экспертами-практиками, подтверждает реальную работоспособность энтропийной методологии по определению агрессивности как отрицательного качества погодо-климатических свойств атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беер В. (1966). Техническая метеорология / Пер. с англ. под ред. Л. Г. Качуркина. — Л.: Гидрометеиздат. 285 с.

Бриллюэн Л. (1960). Наука и теория информации. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 392 с.

ГОСТ 26883-86 (1986). Внешние воздействующие факторы. — М.: Изд-во стандартов. 11 с.

ГОСТ 9249-59 (1971). Нормальная температура. — М.: Изд-во стандартов. 2 с.

ГОСТ 8.395-80 (1981). ГСИ Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. — М.: Изд-во стандартов. 7 с.

ГОСТ 15150-69 (СТ СЭВ 991-78) (1991). Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. — М.: Изд-во стандартов. 58 с.

ГОСТ 16350-80 (1981). Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. — М.: Изд-во стандартов. 140 с.

ГОСТ 25650-83 (1983). Климат Антарктиды. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. — М.: Изд-во стандартов. 53 с.

Кожевников Б. Л. (2010а). Методика расчета комплексных оценок агрессивности погодно-климатических условий для технических целей / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Специальность 25.00.30 — метеорология, климатология, агрометеорология. — СПб, изд. ГГО. 34 с.

Кожевников Б. Л. (2010б). О расчете комплексных оценок агрессивности погодно-климатических условий для техники // Общество. Среда. Развитие. № 3. С. 34—238.

Кох П. И. (1981). Климат и надежность машин. — М.: Машиностроение, 1981. 174 с.

Новицкий П.В. (1968). Основы информационной теории измерений. — Л.: Энергия. 248 с.

Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики (2008) / Под ред. Н. В. Кобышевой.— СПб, изд. ГГО, с. 334 [электронный ресурс] URL:<http://www.voeikovmgo.ru/download/publikacii/2008/Rukovodstvo.pdf> (дата обращения 09.10.2011).

Сергеева Г. А. (2007). Оценка биоклиматических условий по рассчитанным значениям показателей комфортности (на примере Волгоградской области) / Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — СПб, РГМУ. 25 с.

Смит К. (1978). Основы прикладной метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат. 423 с.

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

24—28 октября 2011 г. в столице Кабардино-Балкарской Республики городе Нальчике на базе Высокогорного геофизического института прошла Всероссийская конференция по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы.

В конференции приняли участие представители Росгидромета, ФГБУ «ВГИ», ФГБУ «ГГО», ФГБУ «ЦАО», ФГБУ «НПО «Тайфун», НИЦ «Планета», АНО Агентства «АТТЕХ», ФГУП «НИПХ», ФГУП «ЧПО им. Чапаева», ОАО «ЛЭМЗ» НПО «Алмаз Антей», Военно-Космической академии им. Можайского, ВНИЦ АТВ, Ставропольского ЦГМС, Специальной службы по активным воздействиям Республики Молдова, Ставропольской, Краснодарской и Северо-Кавказской ВС по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы.

Работа конференции проходила по четырем секциям.

Секция 1. Исследования процессов облако- и осадкообразования.

Секция 2. Методы и технические средства активных воздействий на гидрометеорологические процессы.

Секции 3 и 4. Оценка эффективности работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы и их экологические аспекты.

Всего на Конференции было представлено 80 докладов, из них 30 устных и 50 стендовых.

От ГГО в работе конференции приняли участие канд. физ.-мат. наук Н. Е. Веремей и д-р геогр. наук, профессор Г. И. Мазуров, которые представили следующие устные доклады:

— «Базовая численная трехмерная модель осадкообразующего конвективного облака», «Опыт применения полуторамерной параметризованной модели конвективного облака для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков» (авторы: Н. Е. Веремей, Ю. А. Довгалюк, М. А. Затевахин, В. Н. Морозов, А. А. Синькевич, А. А. Игнатъев, Р. С. Пастушков);

— «Оценка экономической эффективности искусственного регулирования зимних ливневых осадков над мегаполисом на примере Санкт-Петербурга» (авторы Г. И. Мазуров, В. Н. Козлов, В. И. Акселевич).

Кроме того, на стендовой сессии от ГГО было представлено семь докладов.

Конференция приняла следующие решения.

1. Просить Росгидромет:

— решить вопрос централизованного финансирования экспериментальных работ (лабораторных и натурных), проводимых научными учреждениями Росгидромета с целью уточнения механизма возникновения опасных гидрометеорологических явлений, разработки и совершенствования методов АВ на них, а также технических средств воздействия;

— решить вопрос о создании ведомственного специального стенда для оперативной проверки эффективности льдообразующих составов, разрабатываемых и используемых для активного воздействия на гидрометеорологические процессы;

— разработать и реализовать механизмы закрепления молодых кадров для их привлечения к проведению научных исследований в системе Росгидромета;

— принять меры по утверждению целевой программы развития и совершенствования системы противорадовой защиты в РФ на период с 2011 по 2014 г.;

— инициировать разработку ведомственной целевой программы по обеспечению сельскохозяйственной безопасности страны методами искусственного регулирования осадков;

— в рамках Соглашения о сотрудничестве стран СНГ в области АВ на гидрометеорологические процессы усилить роль Росгидромета как научно-методического центра стран СНГ, являющихся потребителями российских технологий и технических средств АВ.

2. НИИ Росгидромета усилить сотрудничество и кооперацию в следующих направлениях:

— разработка общей концепции развития работ в области АВ на метеорологические и другие геофизические процессы с учетом современных достижений в области науки и техники и потребностей национальной экономики;

— организация и проведение лабораторных и натуральных экспериментов по исследованию физики образования осадков (в том числе градовых), испытанию новых и совершенствованию существующих методов АВ на них;

— проведение геофизического мониторинга и интерпретация данных, получаемых с помощью новых технических средств;

— дальнейшее исследование возможностей воздействия на теплые облака и туманы различными методами;

— исследование особенностей воздействия на зимние облака с целью пространственного перераспределения выпадения снега;

— усовершенствование технологий ослабления летних и зимних ливневых осадков над мегаполисами во избежание наводнений и снежных завалов.

3. НИИ Росгидромета особое внимание уделить разработке многомерных численных моделей облаков с детальным описанием микрофизики для исследования закономерностей образования осадков, разработки новых и физического обоснования применяемых концепций воздействия. Считать также целесообразным проведение исследований по разработке более простых численных моделей конвективных систем для решения частных задач.

4. ВГИ совместно с Северо-Кавказской ВС создать единый учебно-показательный центр по АВ на грозо-градовые процессы в районе г. Нальчика.

5. Разработать целевую программу по развитию работ по искусственному регулированию осадков и рассеянию облаков и туманов.

6. В рамках программы геофизического мониторинга и создания Северо-Кавказской автоматизированной радиолокационной метеорологической сети ВГИ совместно с ГГО, ЦАО и СК УГМС изучить требования различных потребителей к радиолокационной, грозопеленгационной и другой геофизической информации и обосновать критерии и перечень поставляемой информационной продукции.

Конференция прошла на высоком научном уровне. Следующую подобную конференцию планируется провести через три года.

Роман Семенович Бортковский К 80-летию со дня рождения

13 января 2012 г. исполнилось 80 лет со дня рождения доктора физико-математических наук, ведущего специалиста в области исследований различных сфер взаимодействия атмосферы и океана Романа Семеновича Бортковского.

Вся жизнь Романа Семеновича неразрывно связана с морем. 15-летним подростком он пришел в Ленинградский яхт-клуб, чтобы овладеть искусством управления парусниками. Юношеское романтическое увлечение переросло в интерес к науке, изучающей физические процессы в океане, — океанологии. Роман Семенович поступил на факультет океанологии Ленинградского гидрометеорологического института. По окончании института в 1954 г. Роман Семенович поступил на службу в Гидрографический отдел Балтийского флота в Таллинне в качестве инженера.

Практическая ежедневная работа по изучению особенностей гидрологии Финского залива и Балтийского моря выполнялась молодым инженером с полной отдачей сил. Уже в Таллинне Роман Семенович начинает работать над проблемой взаимодействия океана и атмосферы, занимающей его и по сей день.

Стремление заниматься наукой привело Романа Семеновича в аспирантуру Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР, куда он поступил в 1957 г. В 1961 г. Р. С. Бортковский защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы расчетов тепла и соли в океане».

Дальнейшие занятия наукой происходили в стенах ГГО. Здесь в 70—80-х годах прошлого века в отделе физики пограничного слоя атмосферы существовала лаборатория морской метеорологии, где Р. С. Бортковский возглавил направление исследований, посвященных изучению взаимодействия океана и атмосферы.

Большой вклад в изучение процессов на поверхности раздела океан—атмосфера внесли исследования Р. С. Бортковского, посвященные описанию процессов тепло- и массопереноса в стратифицированном приповерхностном слое. Особенностью этих работ стала разработка параметризаций физических процессов на основе сис-

тематизации и обобщения экспериментальных данных, входящих в обязательную программу стандартных гидрометеорологических судовых наблюдений. Проведенные под руководством Р. С. Бортковского разработки явились основой методических указаний по расчету потоков тепла, влаги и количества движения над морской поверхностью, до настоящего времени используемых при анализе особенностей структуры приповерхностного слоя воздуха. Методические указания разработаны с учетом возможностей использования их в судовых условиях и обобщают личный опыт автора, полученный в многочисленных экспедициях в разные районы океана.

Результаты обобщения данных наблюдений, проводившихся под руководством Р. С. Бортковского, составляют важную часть в научном багаже этого исследователя. География исследований весьма обширна: от Северной Атлантики до Антарктиды. Р. С. Бортковский принимал участие в одиннадцати многодневных океанских экспедициях.

Цикл работ по изучению особенностей динамического взаимодействия и массо- и теплообмена при сильных ветрах был начат Р. С. Бортковским в начале 70-х годов и в дальнейшем успешно продолжен работами, посвященными теоретическому описанию механизмов переноса массы и энергии пузырьками, образующимися при обрушении ветровых волн, а также исследованиями прибрежных районов и работами по анализу роли штормов в процессах макромасштабного и мезомасштабного переноса.

Все эти исследования обобщены в докторской диссертации Р. С. Бортковского «Процессы тепло- и влагопереноса в приводном слое атмосферы при шторме».

Широкую известность в мировом научном сообществе работы Р. С. Бортковского приобрели после публикации за рубежом его книги «Air-sea exchange of heat and moisture during storms» под редакцией известного океанолога Монахана.

Несколько монографий, опубликованных Р. С. Бортковским лично и в соавторстве, являются настольными книгами специалистов по взаимодействию океана и атмосферы и молодых ученых, начинающих изучать эту проблему.

С начала 90-х годов основные интересы исследовательской работы Р. С. Бортковского сосредоточились на проблемах газообмена в системе океан—атмосфера. В этих исследованиях особое внимание уделялось работам, посвященным влиянию температуры воды на состояние морской поверхности и на процессы энергообмена. Эти пионерские работы открывают перспективу использования выявленных закономерностей при параметризации подсеточных явлений в задачах моделирования изменений климата и в задачах дистанционного альтиметрического определения скорости ветра над океаном.

Работы Р. С. Бортковского последнего времени по оценке газопереноса через лед в арктических районах являются основой для дальнейшего исследования структуры пограничных слоев океана и атмосферы в полярных морях и климата этих регионов.

Р. С. Бортковский известен среди коллег по работе в ГГО и экспедициях как человек кристальной честности, высоких моральных качеств и, кроме того, как добрый и верный товарищ, всегда готовый прийти на помощь.

Всю свою жизнь Р. С. Бортковский увлекался спортом — от парусного спорта в молодые годы до постепенно сменивших его лыж, альпинизма и велосипеда. В этих видах спорта он достиг неплохих результатов.

Р. С. Бортковский награжден медалью ордена «За заслуги перед отечеством» и нагрудным знаком «Почетный работник Гидрометслужбы России».

Коллектив ГГО сердечно поздравляет Р. С. Бортковского с юбилеем, желает ему творческого долголетия, здоровья и любви близких.

Хайруллин Камиль Шейхович **К 75-летию со дня рождения**

14 января 2012 г. исполнилось 75 лет ведущему научному сотруднику Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, кандидату географических наук, специалисту в области прикладной климатологии и биометеорологии Камиллю Шейховичу Хайруллину.

Камиль Шейхович родился в 1937 г. в городе Сретенске Читинской области в семье агрономов. Его отец был специалистом в области селекции и агротехники, Героем Социалистического Труда, депутатом Верховного Совета СССР, возглавлял НИИСХ Оренбурга.

В 1959 г. К. Ш. Хайруллин окончил Казанский государственный университет по специальности «метеорология и климатология» и по распределению поступил на службу в качестве борт-аэролога на пункте самолетного зондирования в Новосибирске. С 1961 по 1963 г. он работал ассистентом в Оренбургском педагогическом институте.

В 1963 г. К. Ш. Хайруллин поступил в аспирантуру ГГО (научный руководитель д-р геогр. наук, проф. И. А. Гольцберг), по окончании которой в 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Оттепели на территории СССР», которая легла в основу его первой монографии (1969 г.).

В 1968—1971 гг. К. Ш. Хайруллин работал на Кубе, где являлся руководителем группы специалистов Гидрометеослужбы СССР по оказанию помощи в развитии Гидрометеослужбы Кубы. В Гаване он окончил Академию испанского языка. В 1977—1980 гг. работал в Анголе экспертом Всемирной метеорологической организации по подготовке кадров для стран бывших португалоязычных колоний. На протяжении ряда лет являлся докладчиком ВМО по климатическим картам и атласам. Подготовленные им Рекомендации включены в Климатический практикум ВМО. К. Ш. Хайруллин принимал участие во многих международных научных конференциях.

С 1983 по 1992 г. К. Ш. Хайруллин заведовал лабораторией микроклимата в отделе прикладной климатологии ГГО, под его руководством выполнялась тема «Климаты больших городов СССР». В период с 1980 по 1992 г. он участвовал в выполнении крупных договорных тем с организацией экспедиций по изучению влияния городов и водохранилищ на микро- и мезоклимат на территории СССР (Якутия, Колыма, Таймыр, Дальний Восток, Северный Кавказ, зона освоения БАМ).

В последние годы при участии К. Ш. Хайруллина подготовлены следующие работы: «Справочник по опасным природным явлениям РФ» (1997); «Климат России» (2002); «Энциклопедия климатических ресурсов РФ» (2005); «Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь», т. I—III (2008—2009); он является автором ряда климатических карт в «Национальном атласе России».

К. Ш. Хайруллин — лауреат ведомственной премии имени А. И. Воейкова (2001, 2006), он награжден знаком «Отличник Гидрометеослужбы СССР» и «Почетный работник Гидрометеослужбы РФ», грамотой Русского географического общества «За выдающиеся достижения в области географии» (2005).

За активную научно-просветительскую деятельность К. Ш. Хайруллин награжден медалями Общества «Знание» РФ: «За вклад в Российское просветительство» (2008) и «Подвижнику просвещения» (2011).

В настоящее время К. Ш. Хайруллин продолжает работу по составлению «Библиографического словаря Гидрометеослужбы России» и «Российского гидрометеорологического энциклопедического словаря».

Сотрудники ГГО поздравляют Камиля Шейховича и желают юбилюру здоровья и дальнейших творческих успехов.

Роберт Алексеевич Круглов **К 75-летию со дня рождения**

5 июня 2012 г. исполнилось 75 лет ведущему специалисту в области разработки средств измерений метеорологического назначения и сертификации метеооборудования, кандидату технических наук, старшему научному сотруднику Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова Роберту Алексеевичу Круглову.

Р. А. Круглов работает в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова с 1963 г., после окончания Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова-Ленина (ЛЭТИ).

Начало деятельности Роберта Алексеевича в Обсерватории пришлось на годы активизации исследований в области методов и технологий метеорологических измерений, в которых заметное место отводилось разработке новых технических средств. Вместе с другими молодыми специалистами Р. А. Круглов с головой окунулся в мир совершенствования и создания новых технических средств метеорологического назначения.

Хорошее базовое образование, полученное в ЛЭТИ, и природная любознательность довольно быстро дали о себе знать в виде рационализаторских предложений и изобретений. В 1975 г. Р. А. Круглов защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Посвятив свою жизнь совершенствованию технологий метеорологических измерений и разработке новых технических средств, Р. А. Круглов стал одним из ведущих специалистов в этой области. Его особый интерес вызывают технологии и средства измерения видимости и высоты нижней границы облаков на аэродромах. При его непосредственном участии разработаны и запущены в серийное производство лазерный измеритель высоты облаков ДОЛ-1, семейство измерителей прозрачности атмосферы ФИ-1, ФИ-2, ФИ-3, коими были оснащены большинство аэродромов России.

В настоящее время профессиональная и творческая деятельность Р. А. Круглова связана с методическим и технологическим

обеспечением работы авиаметеорологической сети, а также с организацией и проведением сертификации метеорологического оборудования аэродромов.

Р. А. Круглов — автор более 50 научных работ, в том числе авторских свидетельств и патентов, ветеран труда, награжден знаками «Изобретатель СССР», «Отличник Гидрометеослужбы СССР», «Почетный работник Гидрометеослужбы России».

Коллеги и друзья сердечно поздравляют Роберта Алексеевича с юбилеем и желают ему здоровья и новых творческих успехов.

Соломон Меерович Персин **К 75-летию со дня рождения**

30 июня 2012 г. исполняется 75 лет известному специалисту в области создания автоматических метеорологических систем, доктору технических наук, главному научному сотруднику, заведующему лабораторией методов метеорологических измерений Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова Соломону Мееровичу Персину.

С. М. Персин начал работать в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в 1960 г., по окончании факультета электроприборостроения Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова-Ленина (ЛЭТИ).

В 1966 г. С. М. Персин защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, а в 1977 г. – доктора технических наук.

Соломон Меерович внес большой вклад в создание теоретических основ автоматизации метеорологических наблюдений, принципов построения автоматизированных систем, методов и алгоритмов автоматических измерений. Он также принимал непосредственное участие в разработке автоматических аэродромных и сетевых метеорологических станций и ряда приборов. Результаты выполненных под руководством С. М. Персина разработок успешно внедрены в наблюдательных подразделениях Росгидромета и других ведомств.

В последние 20 лет деятельность С. М. Персина сосредоточена на автоматизации авиаметеорологических измерений на аэродромах. Разработанные под его руководством автоматические информационно-измерительные системы, установленные на многих аэродромах, отличаются высоким уровнем автоматизации измерений и обобщения информации, надежностью в работе.

С. М. Персиным опубликовано более 150 научных работ, среди них несколько монографий. Он автор 20 авторских свидетельств.

С. М. Персин — член Ученого совета ГГО, академик Российской метеорологической академии. Награжден медалями ВДНХ, знаками «Отличник Гидрометеослужбы СССР», «Почетный работник Гидрометслужбы России».

Коллеги и друзья сердечно поздравляют Соломона Мееровича с юбилеем и желают ему здоровья и новых творческих успехов.

Памяти Льва Рахмиловича Сонькина (1928—2011)

27 октября 2011 г. скоропостижно скончался Лев Рахмилович Сонькин — специалист в области исследования и прогноза загрязнения атмосферного воздуха, доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования и прогноза загрязнения атмосферы Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова.

Научная, трудовая и общественная жизнь Льва Рахмиловича Сонькина была связана с отделом исследований и мониторинга загрязнения атмосферы Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, куда он поступил на работу в 1960 г.

В 1962 г. Л. Р. Сонькин закончил аспирантуру ГГО и защитил кандидатскую диссертацию, а в 1984 г. — диссертацию на соискание ученой степени доктора географических наук на тему «Краткосрочное прогнозирование загрязнения атмосферы». В 2003 г. ему было присвоено звание профессора.

Л. Р. Сонькин сыграл определяющую роль в создании и развитии нового научного направления в системе Гидрометслужбы нашей страны — прогноза загрязнения атмосферного воздуха, которое является важной частью мониторинга загрязнения атмосферы. В процессе исследований были учтены основные закономерности распространения примесей в атмосфере и особенности влияния метеорологических условий на загрязнение воздуха в конкретных городах. Благодаря этому впервые удалось добиться хорошей оправдываемости прогнозов высоких уровней загрязнения воздуха. Результаты исследований нашли широкое применение в России и в республиках бывшего СССР. Работы по прогнозированию характеристик загрязнения воздуха регулярно проводятся в 250 городах России. Эти прогнозы учитываются при осуществлении производственных мероприятий по сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу при неблагоприятных метеорологических условиях.

Среди многочисленных публикаций Льва Рахмиловича особого внимания заслуживают монографии «Зимние синоптические

процессы района дальневосточных морей и прогнозы погоды на 3—7 дней» (1962), «Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы» (1991), «Руководство по прогнозу загрязнения воздуха» (1979, 1992).

До последних дней своей жизни Л. Р. Сонькин принимал активное участие в научно-методическом руководстве работами по прогнозу загрязнения атмосферного воздуха на сети Росгидромета, уделял большое внимание подготовке научных кадров.

Лев Рахмилович был скромным и исключительно доброжелательным человеком. Его отличало умение создать в коллективе дружескую и творческую обстановку.

Уход Льва Рахмиловича Сонькина — невосполнимая потеря для Главной геофизической обсерватории, его коллег и всех, кто его знал.

УДК 551.5+327+339

Финансы и климатические риски. Салль М. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 7—21.

Работа сделана в рамках обсуждений, связанных с макроэкономическими последствиями изменения климата для Российской Федерации. Главной задачей является обзор проблем, возникающих в финансовых структурах, которые вызваны происходящими климатическими изменениями. Рассматриваются некоторые механизмы адаптации финансовой системы и адаптации реального сектора экономики, которые базируются на различных финансовых инструментах. Таким образом, наша задача — обозначить круг связанных с климатическими изменениями проблем, с которыми столкнется российская финансовая система. В настоящее время в деятельности российских страховых и инвестиционных компаний, а также в правительственной финансовой политике отмеченные проблемы во внимание не принимаются, поэтому мировой опыт может быть для нас полезен.

Климатические изменения и их влияние на финансовую систему рассматриваются как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Кроме того, в работе обсуждаются некоторые инструменты системы страхования и погодные фьючерсы и опционы на Чикагской товарной бирже, а также связанные с ними проблемы, зависящие от климата.

Ключевые слова: изменения климата, финансовые структуры, адаптация.

Табл. 5. Библ. 7.

УДК 620.9

Экономическое обоснование выбора возобновляемых источников энергии (на примере Дальневосточного региона России). Кобышева Н. В., Кобышев Н. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 22—48.

Представлена методика, состоящая из трех самостоятельных частей. Сначала оцениваются экономические ресурсы различных видов возобновляемой энергии, затем обосновывается инновационная привлекательность использования каждого из них, и в заключение принимается решение о выборе ВИЭ.

Применение данной системы методов проиллюстрировано на примере для территории Дальнего Востока. Данный регион попадает в зону риска, создаваемого сейсмической и погодными угрозами. Поэтому в данном регионе требуется корректировка энергетической политики.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, экономические ресурсы, возобновляемая энергия, энергетическая политика.

Табл. 17. Ил. 4. Библ. 9.

УДК 551.510.42

Моделирование характеристик загрязнения воздуха атмосферными аэрозолями для практических приложений. Генихович Е. Л., Грачева И. Г., Ионин В. А., Оникул Р. И., Румянцев Д. Ю., Филатова Е. Н., Яковлева Е. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 49—78.

Рассматриваются задачи расчета вертикального распределения аэрозолей (в том числе, гигроскопических) в приземном слое атмосферы, а также совместной или отдельной оценки их гравитационного выпадения и сухого осаждения. Соответствующие уравнения решены аналитически или численно. Представлено сравнение с данными натурных экспериментов.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, пыль, вертикальное распределение, выпадение, подстилающая поверхность, планшет, атомная электростанция.

Табл. 5. Ил. 5. Библ. 48.

УДК 551.510.42

К анализу последствий высокого загрязнения воздушного бассейна Москвы летом 2010 г. Генихович Е. Л., Киселев А. В., Смирнова И. В., Чичерин С. С. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 79—88.

С использованием данных инструментального мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в Москве в 2010 г., и в частности в период с интенсивными лесными пожарами, выполнены количественные оценки вклада отдельных вредных примесей в острый и хронический риск для здоровья населения. Показано, что в острый риск основной вклад вносит загрязнение воздуха мелкодисперсными аэрозолями, а в хронический риск — воздействие формальдегида, бенз(а)пирена и мелкодисперсного аэрозоля. Сформулированы предложения по ограничению возможных негативных последствий при возникновении в будущем сходных ситуаций.

Ключевые слова: лесной пожар, атмосферный аэрозоль, пыль, Москва, высокое загрязнение воздуха, смертность, риск для здоровья населения.

Табл. 3. Ил. 1. Библ. 14.

УДК 551.510

Возможность оценки высоких концентраций формальдегида при изменении температуры воздуха. Безуглая Э. Ю., Загайнова М. С., Ивлева Т. П. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 89—102.

Исследована зависимость изменения концентрации формальдегида от температуры воздуха по данным наблюдений за 2001—2010 гг. в 19 городах России. Показана возможность прогноза концентрации формальдегида по изменениям температуры воздуха в летний период. Увеличение коэффициента трансформации оксида азота в диоксид азота, как и увеличение концентрации формальдегида в период 1997—2010 гг., указывает на рост химической активности атмосферы.

Ключевые слова: прогноз концентрации формальдегида, оксиды азота, коэффициент трансформации, тенденция, территория России.

Табл. 3. Ил. 13. Библ. 5.

УДК 551.510.42

Моделирование асинхронности выбросов источников с помощью дискретных случайных величин. Зив А. Д. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 103—114.

Учет асинхронности выбросов источников часто позволяет сделать расчеты концентраций загрязняющих веществ более реалистичными. Однако точный учет комбинаций одновременной работы источников почти невозможен. В связи с этим предлагается простая модель источников, в которой они представляются как дискретные случайные величины. В результате распределение концентрации является распределением суммы случайных величин. Показано, что для аппроксимации этого распределения могут быть использованы два эффективных (с точки зрения времени CPU и точности) метода.

Ключевые слова: эмиссии источников, дискретные случайные величины, распределение, загрязнение воздуха.

Табл. 3. Библ. 5.

УДК 551.576

Климатология облачности по результатам международного спутникового проекта. Покровский О. М. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 115—131.

Представлены результаты анализа климатических рядов глобальной и региональной облачности за 1983—2009 гг. Данные получены в рамках международного спутникового проекта ISCCP. Описывается технология статистического анализа временных рядов, включающая алгоритм сглаживания и вейвлет-анализ. Обе методики предназначены для анализа нестационарных рядов. Результаты анализа показывают, что как глобальная, так и региональная облачность демонстрируют убывание на 2—6 %. Наибольшее убывание наблюдается в тропиках и над океанами; над сушей оно минимально. Коэффициент взаимной корреляции рядов облачности, с одной стороны, и рядов глобальной температуры воздуха и поверхности океана, с другой стороны, достигает $-0,84\dots-0,86$.

Ключевые слова: климатология, глобальная и региональная облачность, климатические ряды, ISCCP, линейный и нелинейный тренд, вейвлет-анализ.

Ил. 8. Библ. 24.

УДК 551.588

Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России. Павлова В. Н., Сиротенко О. Д. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 132—151.

Представлены обновленные оценки линейных трендов температуры воздуха и количества осадков для территории сельскохозяйственной зоны России. Получены физико-статистические зависимости, позволяющие исследовать влияние изменений климатических факторов на урожайность по отдельным регионам. Оценена климатообусловленная составляющая положительных в целом трендов урожайности зерновых культур за период «взрывного» потепления климата, с 1975 по 2010 г. Установлено, что наблюдаемые изменения климата способствуют росту урожайности озимой пшеницы на всей территории со скоростью около 2,6 % за 10 лет.

Ключевые слова: изменения климата, продуктивность сельского хозяйства, тренды.

Табл. 7. Ил. 2. Библ. 18.

УДК 630:551.583(470+570)

Опыт агроклиматического и оперативного мониторинга засушливых явлений в России по наземным данным. Зоидзе Е. К., Задорнова О. И., Хомякова Т. В. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 152—164.

Обсуждается единая система мониторинга засушливых явлений в России по наземным данным, включающая агроклиматический и оперативный мониторинг засушливых явлений. Рассматриваются методы агроклиматического и оперативного мониторинга засушливых явлений: создание и регулярное обновление научно-прикладных справочников по засушливым явлениям, подготовка агроклиматических атласов и исследование динамики вероятности лет с засухами различной интенсивности, а также методы мониторинга засушливых явлений, включающие методику мониторинга возникновения и развития засушливых явлений, подготовку и выпуск декадного бюллетеня засушливых явлений, создание и ведение фонда агроклиматических характеристик засушливых явлений.

Ключевые слова: агроклиматический мониторинг, оперативный мониторинг, засушливые явления, вероятность почвенных засух.

Табл. 2. Ил. 4. Библ. 10.

УДК 551.577.38: 632.112(470):551.533.2

Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории европейской части России. Черенкова Е. А., Кононова Н. К. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 165—187.

По данным ежедневных наблюдений за температурой приземного воздуха и суточными суммами осадков на 44 метеостанциях исследовано развитие опасной атмосферной засухи на территории европейской части России летом 1972 и 2010 гг. Выявлены сходство и различие очагов распространения опасной атмосферной засухи в эти годы, ее пространственно-временные особенности, макроциркуляционные условия формирования. Исследован вклад в формирование засушливости каждого типа элементарного циркуляционного механизма по типизации Б. Л. Дзердзеевского.

Ключевые слова: опасная атмосферная засуха, циркуляция атмосферы Северного полушария, элементарный циркуляционный механизм.

Табл. 4. Ил. 2. Библ. 38.

УДК 551.521.31

Тенденции временных изменений суммарной солнечной радиации в Европе. Самукова Е. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 188—204.

Представлены результаты анализа изменений сезонных и годовых значений суммарной солнечной радиации, измеренной на 69 актинометрических станциях Европы за период 1964—2010 гг. Тенденции изменения радиации оценены коэффициентами линейного тренда и их доверительной вероятностью. Выявлено уменьшение суммарной радиации в период 1964—1989 гг. и ее увеличение в 1990—2010 гг. на большинстве станций.

Ключевые слова: уменьшение и увеличение поступления солнечной радиации на земную поверхность, аппроксимация линейным трендом.

Табл. 1. Ил. 4. Библ. 24.

УДК 551.594.21

Распределение электрического поля, создаваемого ионосферным генератором, в нижних слоях атмосферы. Морозов В. Н. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 205—215.

Рассматривается стационарная задача о распределении в нижних слоях атмосферы электрического поля, создаваемого ионосферным электрическим генератором, который действует в верхних слоях атмосферы. Предполагается, что электрическая проводимость атмосферы может быть представлена в виде трех экспоненциальных функций. На основе нестационарной одномерной модели электрического поля атмосферы рассчитано время установления стационарного электрического поля в нижних слоях атмосферы при включении ионосферного электрического генератора. Рассчитано также время диссипации электрического поля и плотности электрического тока атмосферы в отсутствие как ионосферного, так и грозового генератора электрического поля.

Ключевые слова: атмосферное электричество, моделирование электрического поля атмосферы.

Табл. 3. Библ. 7.

УДК 551.509.543

Теоретическое обоснование искусственного вызывания осадков из облаков заряженными гигроскопическими реагентами. Козлов В. Н., Клинго В. В. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 216—231.

Представлено теоретическое описание генерирования пиротехническим путем заряженных гигроскопических капель, которые, взаимодействуя с каплями естественной облачной среды, приводят к росту капель в облаке до размеров капель выпадающих осадков. Выполнен расчет числа электронов эмиссии, достигающего 10^{18} . Установлено, что все электроны эмиссии пошли на образование отрицательных ионов с молекулами кислорода. После прекращения эмиссии оставшиеся легкие ионы распределяются между положительно заряженными частицами после эмиссии и частицами без эмиссии. В результате получается 3 % частиц, имеющих заряд $1900 e^+$, и 97 % частиц, имеющих заряд $63 e^-$.

Ключевые слова: облако, осадки, гигроскопический реагент, искусственное вызывание осадков.

Табл. 3. Ил. 1. Библ. 15.

УДК 551.576

Опытная эксплуатация образца ДМРЛ-С на позиции Валдай и анализ результатов количественной статистической оценки оправдываемости распознавания гроз на основе сопоставления с данными наземной наблюдательной сети и спутниковой информации. Горбатовская А. С., Дорофеев Е. В., Попов И. Б., Тарабукин И. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 232—245.

В 2011 г. доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С проходил опытную эксплуатацию в европейской части России — на Валдае. В работе представлены результаты сопоставления радиолокационной информации о таком опасном явлении, как гроза, с данными наземной наблюдательной сети. Были определены статистические характеристики, по результатам которых можно делать выводы об объективных обстоятельствах, вследствие которых ДМРЛ-С может не выявить опасные явления погоды.

Ключевые слова: опасное явление погоды, гроза, метеорологический радиолокатор, сопоставление информации.

Табл. 3. Ил. 6. Библ. 4.

УДК 551.576

Особенности комплексирования разнородной метеорологической информации для обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов в комплексной автоматизированной информационно-измерительной системе гидрометеорологического обеспечения безопасности полетов авиации ВМФ «КАСМЕТЕО-К». Дорофеев Е. В., Дроздов А. Е., Тарабукин И. А., Мирончук А. Ф., Шаромов В. Ю. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 246—256.

Представлена современная технология объединения разнородной гидрометеорологической информации на единой картографической основе для решения задач диагноза и прогноза погоды при обеспечении полетов летательных аппаратов берегового и палубного базирования.

Ключевые слова: гидрометеорологическая информация, объединение разнородной информации, технология объединения.

Ил. 7.

УДК 501.508

Состояние и тенденции развития аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем. Персин С. М., Анискин Л. В., Медведев Д. Н. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 257—262.

Рассмотрены тенденции развития и совершенствования системы метеорологического обеспечения взлета и посадки воздушных судов с использованием аэродромных метеорологических информационно-измерительных комплексов. Указаны основные направления разработки и внедрения на аэродромах метеорологических систем, в том числе повышение уровня автоматизации метеообеспечения на аэродроме, внедрение дополнительных датчиков и алгоритмов обработки, повышение гибкости и надежности системы, расширение круга решаемых задач, автоматизация работы аэродрома в целом.

Ключевые слова: аэродром, метеорологическое обеспечение, автоматизация, метеорологические датчики и системы.

Библ. 2.

УДК 551.551.8; 551.556.4

Определение наиболее репрезентативных обратных траекторий в зависимости от выбора вертикальной координаты. Ивахов В. М., Зинченко А. В. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 263—276.

Предложен метод определения наиболее репрезентативных обратных траекторий. В качестве решения предлагается проведение сравнения обратных траекторий, равномерно распределенных по высоте и построенных для одного случая, и кластерного анализа с целью определения наиболее репрезентативных траекторий. Среднее значение максимального расстояния $\overline{S_{\max}}$ между соответствующими элементами трехдневных обратных траекторий, построенных для п. Воейково (59°57' с. ш., 30°42' в. д.) и высот 50, 100, ..., 500 м, оказалось приблизительно равным 850 км. Максимальное значение S_{\max} составило 4448 км. В результате анализа каждой серии из десяти обратных траекторий было получено от одной до четырех траекторий, наиболее полноценно описывающих перенос для данного случая. Также предложено использовать веса для полученных средних траекторий в зависимости от числа траекторий в кластере.

Ключевые слова: траекторный анализ, кластерный анализ, обратные траектории.

Ил. 4. Библ. 16.

УДК 551.508:551.585

О расчете нагрузок экстремальных температур воздуха на технику. Кожевников Б. Л. Труды ГГО. 2012. Вып. 565. С. 277—284.

С помощью энтропийной методологии подтверждено мнение специалистов, эксплуатирующих технику, о соотношении оценок нагрузок при экстремальных отклонениях температуры воздуха (от нормальных значений) как воздействующих климатических факторов агрессивности погодно-климатических условий атмосферы.

Ключевые слова: качество атмосферы для техники, погодно-климатические условия, оценка агрессивности, воздействующие климатические факторы, нормальные условия, экстремальные отклонения температуры воздуха, отношение оценок нагрузок.

Библ. 15.

УДК 551.5+327+339

Finances and climatic risks. Sall M.A. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 7—21.

This paper was done in the framework of the discussions concerned with macroeconomics implications of climate change for Russian Federation. The main task is to review the issues arising in the financial structures that are occurring due to climate change. We consider some of the mechanisms of adaptation of the financial system and mechanisms of adaptation of real sector of economics which are based on various financial instruments. Thus, our task is to mark associated with climate change issues to be faced by the Russian financial system. At present, Russian insurance companies, investment companies as well as government financial policy does not take into account the mentioned problems, so international experience may be helpful for us.

Climate change and its impact on the financial system are considered in both the short and long term. Additionally, the paper discusses some of the tools of insurance and weather futures and options on the Chicago Mercantile Exchange and related problems, depending on the climate.

Keywords: climate change, financial structures, adaptation.

Tab. 5. Ref. 7.

УДК 620.9

Economic justification of renewable energy source selection. Kobysheva N. V., Kobyshev N. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 22—48.

Methodology of optimal renewable energy source selection includes three stages. At the first stage economic resources of the different types of renewable energy were estimated. Then the investment prospects of each energy source were assessed. In conclusion a decision on optimal energy source was made.

Application of methodology presented can be shown by example of Far east region. This area refers to risk zone because of seismic and weather hazards. Therefore in this region detailed adjustment of energy policy is required.

Keywords: renewable energy source, economic resources, renewable energy, energy policy.

Tab.17. Fig. 4. Ref. 9.

УДК 551.510.42

Characteristics of the aerosol atmospheric pollution: modeling for practical applications. Genikhovich E. L., Gracheva I. G., Ionin V. A., Onikul R. I., Rumyantsev D. A., Filatova E. N., Yakovleva E. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 49—78.

Problems related to calculation of the vertical distribution of aerosols (including hygroscopic ones) in the atmospheric surface layer, as well as either joint or separate estimates of their gravitational sedimentation and dry deposition are considered. Corresponding equations are solved either analytically or numerically. Comparisons with data of field experiments are presented too.

Keywords: atmospheric aerosol, dust, vertical distribution, deposition, underlying surface, horizontal aerosol sampler, nuclear power plant.

Tab. 5. Fig. 5. Ref. 48.

УДК 551.510.42

On analysis of consequences of episodes of high atmospheric pollution in Moscow in summer 2010. Genikhovich E., Kiselev A., Smirnova I., Chicherin S. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 79—88.

Using data of the instrumental monitoring of the air pollution in Moscow in 2010 including the time period with intensive wildfires, quantitative estimates of contributions of different harmful pollutants to the acute and chronic risk for population health were calculated and presented in this paper. It was shown that the major input into the acute risk was attributed to the fine-particle atmospheric pollution, and the major chronic risk was due to the impact of formaldehyde and benz(a)perene. Certain propositions are formulated about measures aimed for limiting possible negative consequences in the future if similar episodes would occur again.

Keywords: wild forest fire, atmospheric aerosol, dust, Moscow, high air pollution, death toll, risk for population health.

Tab. 3. Fig. 1. Ref. 14.

УДК 551.510

Possibility of assessment of high concentrations of formaldehyde at changes in air temperature. Bezuglaya E. Y., Zagainova M. S., Ivleva T. P. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 89—102.

The dependence between changes in formaldehyde concentrations in 19 Russian cities and air temperature was investigated according to observations of 2001—2010. The possibility of forecast of formaldehyde concentration at changes in the air temperature in the summer is shown. The increase in turn ratio of nitric oxide to nitrogen dioxide, as the increase in formaldehyde concentration indicates the growth in chemical activity of the atmosphere for the period 1997—2010.

Keywords: forecast of formaldehyde concentration, nitric oxides, turn ratio, tendency, the territory of Russia.

Tab. 3. Fig. 13. Ref. 5.

УДК 551.510.42

The discrete random variable model of the source emissions asynchronicity. Ziv A. D. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 103—114.

The account for the source emissions asynchronicity is often a valuable tool to make the estimations of the air pollution more realistic. However the precise description of the combinations of simultaneous work of different sources is nearly impossible. Therefore a simple random variable model of source emissions is proposed. The distribution of the concentration is then the distribution of the sum of random variables. It is shown that there are at least two methods which could be exploit for the effective (from the points of accuracy and CPU time) approximation of this distribution.

Keywords: source emissions, discrete random variable, distribution, air pollution.

Tab. 3. Ref. 5.

УДК 551.576

The cloudiness climatology research based on the International Satellite Cloud Climatology Project Data. Pokrovsky O. M. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 115—131.

Results of a comprehensive analysis of the global and regional cloudiness for 1983—2009 have been presented. The monthly data obtained in frame of the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) were used in this study. The approach based on implementation an original smoothing technique and the wavelet analysis was implemented in this research. Both techniques are appropriate to be applied to non-stationary time series. It was shown that there is a decreasing trend in total cloudiness of 2—6 % size for global and regional scales. Greatest decreasing tendencies were found in the tropic belt and over the oceans. Least decreasing was found over the land. The crosscorrelation coefficients between the global cloudiness on one hand and the surface air temperature and the sea surface temperature climate series on other hand have achieved the 84—86 % levels for 1983—2009.

Keywords: cloudiness, ISCCP data, climate change, global and regional scale, climate series analysis, linear and nonlinear trends, wavelet analysis.

Fig. 8. Ref. 24.

УДК 551.588

Observed climate trends and dynamics of Russian agriculture productivity. Pavlova V. N., Sirotenko O. D. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 132—151.

Updated estimates for linear trends of air temperature and precipitation for the area of agricultural zone of Russia are presented. Physical-statistical relationships were obtained. They allow to investigate the effect of climatic factors changes on the productivity for certain regions. The component in the trends of grain yields occurring due to climate change were estimated for the period of “explosive” warming, from 1975 to 2010. These trends were found positive for overall. It was established that the observed climate changes contribute to the growth of winter wheat yields at a speed of about 2,6 % for 10 years for the whole Russia territory.

Keywords: climate change, agricultural productivity, trends.

Tab. 7. Fig. 2. Ref. 18.

УДК 630: 551.583(470+570)

Practice agroclimatic and operational monitoring drought events in Russia on ground data. Zoidze E., Zadornova O., Khomyakova T. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 152—164.

A unified system for monitoring of drought events in Russia on ground data including agroclimatic and operational monitoring of drought events were discussed. Methods of agroclimatic and operational monitoring of drought events were considered. The methods include creation and regular updating of science and application catalog on drought events, the preparation agroclimatic atlases and research dynamics of probability of the years with drought of varying intensity and methods for monitoring drought events, together with the methodology of the monitoring beginning and development drought events, creating and expanding of the bank agroclimatic characteristic of drought events.

Keywords: agroclimatic monitoring, operating monitoring, drought events, probability drought events.

Tab. 2. Fig. 4. Ref. 10.

УДК 551.577.38: 632.112(470):551.533.2

Analisis of a severe atmospheric drought in 1972 and 2010 and macrocirculation conditions of its formation over the european part of Russia Cherenkova E., Kononova N. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 165—187.

Development of a severe atmospheric drought in the territory of the European Russia in the summer 1972 and 2010 according to daily observations of the surface air temperature and precipitation at 44 meteorological stations was investigated. Similarity and differences between the seats of severe atmospheric drought of these years, spatial-temporal characteristics of drought, macrocirculation conditions of its formation have been identified. Contribution to the aridity formation of each type of elemental circulation mechanism in the B.L.Dzerdzevskii classification was investigated.

Keywords: severe atmospheric drought, atmospheric circulation of Northern Hemisphere, elementary circulation mechanism.

Tab. 4. Fig. 2. Ref. 38.

УДК 551.521.31

Evaluation of long-term changes of global solar radiation in Europe.
Samukova E. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 188—204.

The results of analysis for changes in the seasonal and annual values of global solar radiation measured at 69 actinometrical stations of Europe for the period of 1964—2010 are presented. The long-term changes of global radiation are estimated by the linear trend coefficients and their confidence probability. The decrease of global radiation over the period of 1964—1989 and its increase in 1990—2010 at the majority of stations are shown.

Keywords: decrease and increase of solar radiation at the surface, approximation by the linear trend.

Tab. 1. Fig. 4. Ref. 24.

УДК 551.594.21

The distribution of electric field made by ionosphere electrical generator in lower atmosphere. Morozov V. N. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 205—215.

The problem of the distribution of electric field made by ionosphere electrical generator in lower atmosphere is solved by using of method of spherical harmonics for conductivity of atmosphere describing by three exponential functions. Calculations of establishment time of stationary electric field in lower atmosphere under switching of ionosphere electrical generator and dissipation time of electric field and density of electrical current in the absence of electrical generators are made by nonstationary 1D model of atmospheric electric field.

Keywords: atmospheric electricity, modeling of atmospheric electric field.

Tab. 3. Ref. 7.

УДК 551.509.543

Theoretical basis for artificial precipitation from the clouds, charged with hygroscopic reagents. Kozlov V. N., Klingo V. V. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 216—231.

The article offers a theoretical description of pyrotechnical generation of charged hygroscopic drops that interact with the drops of natural cloud environment, which leads to coagulation of drops in a cloud to the size of regular precipitation. The article suggests the exact calculation of the quantity of emission electrons, that reaches 1018. It has been proven that all the emission electrons are used in creation of negative ions with oxygen molecules. After the emission is over the remaining light ions are distributed among positively charged particles and the particles without emission. In the result 3 % of particles have the charge of $1900 e^+$ and 97 % of particles have the charge $63e^-$.

Keywords: cloud, precipitation, hygroscopic reagents, artificial precipitation

Tab. 3. Fig.1. Ref. 15.

УДК 551.576

Operation testing of sample DMRL-C on a position Valdai and the analysis of comparison radar data about dangerous weather events with surface observations and satellite information. Gorbatovskaya A. S., Dorofeev E. V., Popov I. B., Tarabukin I. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 232—245.

In 2011 the Doppler meteorological radar DMRL-C was tested in the European part of Russia on Valdai. The article presents the results of comparison of the radar data on such dangerous weather events as a thunder-storm and the surface observations data. Some statistical characteristics were estimated. These characteristics can show possible reasons why the DMRL-C wasn't able to recognize the dangerous weather events.

Keywords: dangerous weather event, thunder-storm, meteorological radar, data comparison.

Tab. 3. Fig. 6. Ref. 4.

УДК 551.576

Features of interconnecting heterogeneous meteorological information to ensure the safety of aircraft in a complex automated information-measuring system of hydrometeorological safety of naval aviation “KASMETEO-K”. Dorofeev E. V., Drozdov A. E. , Tarabukin I. A., Mironchuk A. F., Sharomov V.Y. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 246—256.

The article presents the latest technology combining heterogeneous hydro-meteorological information based on a single map for solving the problems of diagnosis and prediction of weather, while ensuring safety of aircraft and shore-based deck.

Keywords: Hydro-meteorological information, union of diverse information, technology association.

Fig. 7.

УДК 501.508

Current state and trends in development of the Aerodrome Meteorological Information and Measurement Systems. Persin S., Aniskin L., Medvedev D. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 257—262.

The tendencies in development and improvement of the meteorological services for aircrafts takeoffs and landings by using the Aerodrome Meteorological Information and Measurement Systems are considered. The main directions of the development and implementation at aerodromes of the meteorological systems are given with emphasis on automation scale increase, integration of additional sensors and data processing algorithms, system flexibility and reliability improvement, widening spectrum of tasks solved and automation of whole aerodrome environment.

Keywords: aerodrome, meteorological system, automation, meteorological sensor.

Ref. 14.

УДК 551.551.8; 551.556.4

Determination of the most representative backwards trajectories depending on its specified arrival heights. Ivakhov V. M., Zinchenko A. V. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 263—276.

A new approach for determination of most representative back trajectories is suggested. Comparison and cluster analysis of a set of 10 three days back trajectories generated for Voeikovo (59°57' N., 30°42' E.) for evenly distributed initial heights are considered. The mean of maximal distance between corresponding endpoints of one set trajectories $\overline{S_{\max}}$ is approximately equal to 850 km, and the maximal $\overline{S_{\max}}$ value equals 4448 km. From one to four representative (mean cluster) trajectories are obtained as a result of analysis of each 10 trajectory set. Also it is offered to assign weights to mean cluster trajectories according to number of trajectories in cluster for further trajectory analysis.

Keywords: trajectory analysis, cluster analysis, back trajectories.

Fig. 4. Ref. 16.

УДК 551.508:551.585

About the load on the technical equipment of extreme air temperatures. Kozhevnikov B. L. Proceedings of MGO. 2012. V. 565. P. 277—284.

The opinion of the technical experts concerning of the load evaluations under extreme air temperature deviation (from normal values) as influencing climate factors of aggressiveness of weather and climate atmospheric conditions has been acknowledged with the help of the entropic methodology.

Keywords: quality of the atmosphere for technical equipment, weather and climate conditions, aggressiveness evaluation, influencing climatic factors, normal conditions, extreme air temperature deviation, ratio of the load evaluations.

Ref. 15.

Опечатки, допущенные в опубликованных сборниках Труды ГГО

Выпуск 564, с. 15, рис. 5.

Напечатано: 2051, 2035, 2035, 2034.

Должно быть: 1951, 1935, 1935, 1934.

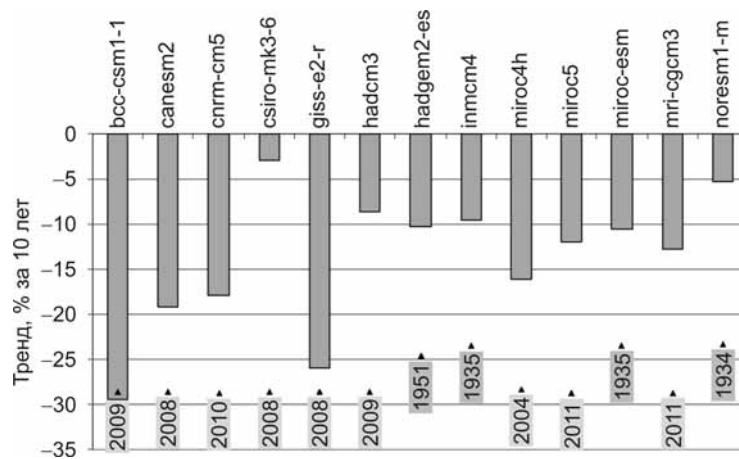


Рис. 5. Максимальный отрицательный тренд площади морского льда в Северном полушарии в сентябре для скользящего тридцатилетия за период 1850—2011 гг. (в долях (% за десять лет) от среднего за 1979—2000 гг.).

Для каждой модели указан год достижения максимального тренда.

Сборник научных трудов

Труды ГГО. Вып. 565

Подписано в печать 01.06.2011. Формат $60 \times 84^{1/16}$. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 20,0. Тираж 300 экз. Заказ

Отпечатано в типографии ООО «Д'АРТ».

195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, 28.

ДЛЯ ЗАМЕТОК