

Федеральная служба  
по гидрометеорологии  
и мониторингу  
окружающей среды



**ТРУДЫ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ  
ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А.И. ВОЕЙКОВА**

**566**  
выпуск

ISSN 0376-1274

## Требования к оформлению рукописей, представленных для публикации

К публикации в сборниках Труды ГГО принимаются результаты оригинальных исследований и сообщения по разделам: физика атмосферы, прикладная метеорология, дистанционное зондирование и активные воздействия, загрязнение атмосферы, климатология.

В комплект рукописи должны входить: основной текст; аннотации на русском и английском языках; электронная версия статьи; акт экспертизы; сопроводительное письмо, подписанное руководителем организации или учреждения, где работает автор; сведения об авторе (авторах) с указанием фамилии, имени, отчества, служебного телефона, электронного адреса, названия и почтового адреса учреждения, в котором была выполнена работа.

На первой странице рукописи в левом верхнем углу должен быть указан индекс по универсальной десятичной классификации (УДК), затем посередине страницы - название работы, инициалы и фамилии авторов, название организации, ее адрес, электронный адрес автора. Аннотации на русском и английском языках объемом не более десяти строк каждая с указанием ключевых слов (не более пяти слов или словосочетаний) и числа таблиц, рисунков и библиографических ссылок представляются на отдельном листе.

Рукопись должна быть набрана шрифтом Times New Roman размером 12 и напечатана через двойной интервал на одной стороне листа А4 с полями: нижнее, верхнее и левое 25 мм, правое 10 мм.

В списке литературы приводятся в алфавитном порядке сначала источники на русском языке, затем иностранная литература. Фамилия и инициалы автора (авторов) выделяются курсивом. Библиографические ссылки по тексту должны иметь следующий вид: (Иванов и др., 2005) или в работе Иванова и др. (2005). При наличии ссылок на несколько работ одного автора, опубликованных в одном году, рядом с годом издания указывается буква русского алфавита, показывающая порядок следования данного издания в списке литературы, например (Иванов, 2005а).

При оформлении списка литературы следует указывать: *для журнальных статей* фамилии и инициалы авторов, год, название статьи, название журнала, номер тома, номер выпуска, страницы; *для книг* фамилии и инициалы авторов, год, полное название книги, место издания (город), издательство, общее число страниц; *для авторефератов диссертаций* фамилию и инициалы автора, год, полное название, степень, специальность, место защиты, страницы; *для депонированных статей* фамилии и инициалы авторов, дату депонирования, название депонированной статьи, регистрационный номер; *для авторских свидетельств* фамилии и инициалы авторов, год, название а.с. и его номер, номер бюллетеня изобретений.

Редакция сохраняет за собой право вносить необходимые редакционные исправления, дополнения и сокращения. Плата с авторов, в том числе аспирантов, за публикацию рукописей не взимается.

Федеральная служба  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. Воейкова

Выпуск  
566

*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.ri.ru](mailto:director@main.mgo.ri.ru)

web site: <http://www.voeikovmgo.ru>

*Редакционная коллегия*

д-р физ.-мат. наук В. М. Катцов, д-р физ.-мат. наук Е. Л. Генихович,  
канд. физ.-мат. наук А. С. Зайцев, д-р физ.-мат. наук, профессор И. Л. Кароль,  
д-р геогр. наук, профессор Н. В. 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.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>В. М. Мирвис, Т. Ю. Львова, В. П. Мелешко, В. А. Матюгин.</i> Опыт калибровки вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха, полученных на основе ансамблевых расчетов по гидродинамической модели атмосферы ГГО .....	7
<i>А. В. Меццарская, М. П. Голод.</i> Оценки оправдываемости оперативных метеорологических прогнозов, составленных методом многофакторной регрессионной средней для основной зерносеющей зоны России и сопредельных стран .....	26
<i>Р. С. Бортковский, Л. Р. Орленко, Е. Д. Надёжина, А. В. Стернзат, Т. В. Павлова, А. А. Пикалёва, Е. К. Молькентин, Б. Н. Егоров.</i> Газообмен через поверхность Баренцева моря (модельные оценки с учетом переноса газа пузырьками при шторме) .....	42
<i>Г. В. Менжулин, А. А. Павловский, С. П. Савватеев.</i> О новой методике статистического моделирования влияния гидрометеорологических факторов на аномалии урожайности сельскохозяйственных культур.....	61
<i>Г. В. Менжулин, А. А. Павловский, С. П. Савватеев.</i> Оценки возможных агроклиматических последствий глобального потепления в сельскохозяйственных регионах Северной Европы .....	78
<i>М. А. Салль.</i> Статистика дневных максимумов температуры в летний период и возможные проблемы энергоснабжения.....	94
<i>М. А. Салль.</i> R/S-статистика атмосферного давления .....	100
<i>Л. А. Майборода., Л. И. Дивинский.</i> Исследование значимости атмосферных возмущений.....	106
<i>Л. А. Майборода., Л. И. Дивинский.</i> Статистический анализ нелинейных систем по линейному приближению .....	116
<i>Ю. А. Довгалюк, А. А. Игнатьев.</i> Некоторые особенности статистики водности полей облаков неглубокой конвекции .....	128
<i>Н. М. Салихов, Я. В. Дробжева, В. М. Краснов, В. И. Дробжев, Б. Т. Жумабаев.</i> Аномалии в записях электрического поля для случая сильного землетрясения в Алматинском сейсмическом регионе .....	139
<i>В. Н. Морозов, М. Шапкалиевски, Л. Р. Орленко.</i> Влияние криптона-85, радона и продуктов его распада на структуру электродного приземного слоя атмосферы .....	155

<i>Л. С. Ивлев, Ю. А. Довгалоук.</i> Влияние влажности на электрические и микроструктурные характеристики аэрозоля .....	169
<i>В. Н. Козлов, В. И. Акселевич, Г. И. Мазуров.</i> Метеоролого-экономическая модель метеозащиты мегаполиса .....	182
<i>В. И. Кондратюк, Д. Н. Медведев, С. М. Персин.</i> Совершенствование технологий метеобеспечения на основе комплексирования автоматизированных метеорологических информационно-измерительных систем и сетей .....	203
<i>С. М. Персин, Л. В. Анискин, Д. Н. Медведев, В. Н. Попов.</i> Автоматическое формирование информации о климатических характеристиках аэродрома .....	214
<i>П. С. Зименков.</i> Измерение толщины водосодержащего слоя дорожным датчиком .....	223
<i>В. М. Шаймарданов, А. Е. Колесников.</i> Технология оцифровки данных с бумажных носителей .....	234
<i>А. Ф. Ануфриева, И. В. Смирнова.</i> Влияние аномальных погодных условий на формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах России .....	246
<i>А. И. Решетников, В. М. Ивахов.</i> Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными судовых наблюдений на шельфе моря Лаптевых) .....	257
<i>Б. Л. Кожевников.</i> Методика квалитетических оценок воздействий температуры воздуха на технику .....	270
<i>И. М. Мамучиев.</i> Оценочные расчеты для разработки метода рассеяния теплых туманов искусственными каплями воды .....	282
<i>О. В. Соколов, М. В. Ушаков.</i> Учет климатических изменений при прогнозировании притока воды в Колымское водохранилище на май .....	289
Анна Васильевна Меццерская .....	298
Борис Михайлович Ильин .....	300
Герман Петрович Резников .....	302

## CONTENTS

<i>V. M. Mirvis, T. Yu. Lvova, V. P. Meleshko, V. A. Matyugin.</i> Calibration of probabilistic surface air temperature forecast based on the MGO atmospheric GCM ensemble runs .....	7
<i>A. V. Meshcherskaya, M. P. Golod.</i> Estimations the success of operative meteorological forecasts, calculated by multiple-factor regression method for the main agricultural zone of Russia and heighbours countries .....	26
<i>R. S. Bortkovski, L. R. Orlenko, E. D. Nadyozhina, A. V. Sternsat, T. V. Pavlova, A. A. Pikaleva, E. K. Molkentim, B. N. Egorov.</i> Air-Sea gas exchange in the Barents Sea (numerical simulation including bubble exchange under the stormy conditions) .....	42
<i>G. V. Menzhulin, A. A. Pavlovsky, S. P. Savvateyev.</i> On advanced statistical modeling of climate factors impacts on crop yield anomalies	61
<i>G. V. Menzhulin, A. A. Pavlovsky, S. P. Savvateyev.</i> Assessments of possible agroclimatic consequences of global warming in north European agricultural regions .....	78
<i>M. A. Sall.</i> Statistics of daily high temperatures in summer and possible problems of energy supply .....	94
<i>M. A. Sall.</i> R/S statistics of atmospheric pressure .....	100
<i>L. A. Maiboroda., L. I. Divinsky.</i> Investigation the significance of atmospheric disturbances.....	106
<i>L. A. Maiboroda., L. I. Divinsky.</i> Statistical analysis of nonlinear systems by linear approximation .....	116
<i>Yu. A. Dovgaluk, A. A. Ignatyev.</i> Some features of liquid water content statistics in shallow convective clouds .....	128
<i>N. M. Salihov, Ya. V. Drobzheva, V. M. Krasnov, V. I. Drobzhev, B. T. Zhumabaev.</i> Anomalies of electric field for case of strong earthquake in the Almaty earthquake region .....	139
<i>V. Morozov, M. Shapkaliyevski, L. Orlenko.</i> The effect of radioactive substances on the structure of the atmosphere's lower electrode surface layer .....	155
<i>L. S. Ivlev, Yu. A. Dovgaluk.</i> The influence of humidity on electric and microstructure aerosol characteristics .....	169

<i>V. N. Kozlov, V. I. Akselevich, G. I. Mazurov.</i> Meteorological-economic model of megapolis meteodefence .....	182
<i>V. J. Kondratjuk, D. N. Medvedev, S. M. Persin.</i> Perfection of technologies of meteorological services on the basis of integration of automated meteorological information-measuring systems and networks .....	203
<i>S. Persin, L. Aniskin, D. Medvedev, V. Popov.</i> Automatic generation of climatic description of the aerodrome .....	214
<i>P. S. Zimenkov.</i> About measurement of a layer thickness by the road device.....	223
<i>V. M. Shaymardanov, A. Ev. Kolesnikov.</i> Procedures for digitizing data from paper forms.....	234
<i>A. F. Anufrieva, I. V. Smirnova.</i> Influence of anomalous weather conditions on the formation of atmospheric pollution level in Russian cities.....	246
<i>A. I. Reshetnikov, V. M. Ivakhov.</i> The results of continuous observation of methane concentration in Tiksi (comparison with the data of ship observations on the Laptev Sea shelf).....	257
<i>B. Kozhevnikov.</i> Qualimetric evaluation methods of the influence of air temperature on technical equipment.....	270
<i>I. M. Mamuchiev.</i> Estimated accounts for development of a method of dispersion of warm fogs by artificial drops of water .....	282
<i>O. Sokolov, M. Ushakov.</i> Inclusion of climate change in predicting the water inflow in the Kolyma reservoir in may .....	289
Anna V. Meshcherskaya.....	298
Boris M. Ilyin .....	300
German P. Reznikov .....	302

**ОПЫТ КАЛИБРОВКИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПРОГНОЗОВ  
ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, ПОЛУЧЕННЫХ  
НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЕВЫХ РАСЧЕТОВ  
ПО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ГГО**

*В. М. Мирвис, Т. Ю. Львова, В. П. Мелешко, В. А. Матюгин*

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

Поступила в редакцию 6.08.2012

В настоящей работе изложены результаты использования трех методов калибровки ансамблей применительно к вероятностному прогнозу приземной температуры воздуха на месяц с детализацией по неделям для территории Северной Евразии. Рассмотрены непараметрический расчет вероятностей с коррекцией смещения (НПКС), параметрический расчет с коррекцией смещения и стандартного отклонения (ПКСС), а также расчет вероятностей на основе модели байесовского усреднения (Bayesian model averaging, ВМА). Представлены результаты сравнения оценок вероятностных прогнозов по данным обучающей выборки 20-летней серии ежемeseчных исторических прогнозов (1982—2001 гг.) на 70 станциях, а также по данным 10-летней серии независимых еженедельных прогнозов на скользящий месяц. Показано, что калибровка на основе методов ПКСС и ВМА при близких результатах имеет явное преимущество перед использованием метода НПКС.

### **Введение**

Хорошо известно, что долгосрочные метеорологические прогнозы содержат значительную долю неопределенности. Для использования прогнозов важно знать возможную ошибку прогноза и доверительный интервал прогностической величины, или в

наиболее общем виде прогностическое вероятностное распределение. На решение этой задачи нацелены системы ансамблевого прогнозирования, активно развивающиеся во всем мире в течение последних двух десятилетий.

Моделирование возможных ошибок прогноза, связанных с неопределенностью начального состояния, осуществляется посредством расчета ансамбля прогнозов с использованием совокупности слабо возмущенных начальных данных, а моделирование неопределенности, связанной с несовершенством моделей (методов параметризации), — посредством ансамблей прогнозов, рассчитанных по разным моделям. Предполагается, что при малом разбросе прогностического ансамбля степень уверенности в прогнозе высока и ошибки прогноза должны быть небольшими. Напротив, широкий разброс ансамблевых прогнозов свидетельствует о большой неопределенности и возможности больших прогностических ошибок.

В случае идеальной модели, наличия единственного источника неопределенности прогнозов, связанного с ошибками начального состояния, и адекватного представления распределения ошибок начальных данных ансамблевые прогнозы могут рассматриваться как выборка из прогностического вероятностного распределения, а стандартное отклонение ансамбля — в качестве меры ожидаемой средней квадратической ошибки прогноза. В действительности, однако, необходимо учитывать несовершенство прогностических моделей, а также далеко не полный учет неопределенности начальных и граничных условий в ограниченном числе членов ансамбля начальных состояний.

В качестве основных недостатков ансамблевого подхода отмечают недостаточное рассеяние ансамбля, с одной стороны, и слабую связь между параметрами изменчивости внутри прогностических ансамблей и ошибками прогнозов, с другой стороны (Grimit, Mass, 2007; Namill, Colucci, 1997). В результате отмеченных особенностей прогностические вероятности, полученные на основе «сырых» ансамблей, часто оказываются неоправданно завышенными, что хорошо видно, в частности, на диаграммах надежности. Из этого следует необходимость калибровки прогно-

стического распределения не только на смещение среднего, но и в части параметров разброса (изменчивости внутри ансамбля).

Последние годы ознаменовались появлением многочисленных зарубежных публикаций, посвященных проблеме калибровки вероятностных прогнозов (Gneiting, Raftery et al., 2005; Gneiting et al., 2007; Hamill et al., 2004; Hagedorn et al., 2008; Raftery et al., 2005; Roulston, Smith, 2003; Wang, Bishop, 2005; Whitaker et al., 2006; Wilks, Hamill, 2007). В работе Gneiting et al. (2007) сформулирована главная цель калибровки, состоящая в достижении согласия между прогностическим распределением и наблюдениями при максимально возможной категоричности прогноза. Для решения этой задачи разными авторами предложено несколько подходов и методов: модель байесовского усреднения (Bayesian model averaging, BMA) (Raftery et al., 2005), коррекция («обогащение») ансамбля (ensemble dressing, ED) (Roulston, Smith, 2003; Wang, Bishop, 2005), неоднородная гауссовская регрессия (non-homogenous Gaussian regression, NGR) (Gneiting, Raftery et al., 2005), логистическая регрессия (logistic regression, LR) (Hamill et al., 2004) и др.

Эти методы были опробованы для калибровки ансамблей и мультиансамблей нескольких моделей при построении вероятностных прогнозов разных метеорологических величин преимущественно на интервалах среднесрочного прогнозирования. Выполнены работы по сравнению эффективности некоторых методов между собой (Wilks, Hamill, 2007), однако вопрос о выборе наилучшего подхода пока остается актуальным.

В работе Мирвис и др. (2006) изложена процедура калибровки ансамблевых месячных прогнозов приземной температуры воздуха, предложенная и использованная ранее в прогнозах ГГО на основе модели общей циркуляции атмосферы T42L14. В указанной процедуре вероятности рассчитывались параметрически в предположении нормального распределения членов ансамбля  $N(\bar{x}, \sigma)$  и двухступенчатой калибровки его параметров.

В настоящей работе представлены результаты сравнения трех методов калибровки применительно к ансамблям прогнозов приземной температуры воздуха на срок до месяца для территории Се-

верной Евразии. Прогнозы рассчитывались с использованием версии модели атмосферы ГГО Т63L25 по ансамблю девяти комплектов слабо возмущенных начальных данных, построенных с использованием технологии выращивания ошибок. Отметим, что указанная модель имеет более высокое пространственное разрешение по сравнению с моделью Т42L14, ранее использовавшейся в месячных прогнозах ГГО (Мирвис и др., 2006). Среднее горизонтальное разрешение составляет  $1,9^\circ$  вместо  $2,8^\circ$ , и почти вдвое увеличено вертикальное разрешение: учитывается 25 слоев вместо 14.

### **Использованные данные и методы расчета прогностических вероятностей**

В анализе использованы два комплекта пар прогностических и фактических данных. Первый из них для каждого пункта включает 240 случаев — это результаты 20-летней серии ежемесячных исторических прогнозов, которые рассчитывались по начальным данным реанализа NCEP/NCAR (реанализ-1) за 00 GMT последних суток, предшествующих месяцу прогноза (с 31 декабря 1981 г. по 30 ноября 2001 г.). Этот комплект был использован для оценки всех калибровочных коэффициентов и параметров и составлял обучающую выборку. Второй комплект (независимую выборку) составили пары прогноз—факт 520 еженедельных прогнозов на скользящий месяц, которые рассчитывались по начальным полям оперативного объективного анализа Гидрометцентра России каждую среду в период 2002—2011 гг.

Прогностические значения средней суточной температуры воздуха в пунктах прогноза для каждого члена ансамбля были получены по модельным полям, представленным данными в узлах сетки  $2,5 \times 2,5^\circ$  с использованием билинейной интерполяции. Далее рассматривались средние за месяц (четыре недели) и средние недельные значения температуры воздуха для 1-, 2-, 3- и 4-й недели прогнозируемого месяца. Эталонные фактические данные для оценки прогнозов были получены на основе средних суточных значений температуры воздуха по данным архива ВНИИГМИ—МЦД.

Ниже будут рассмотрены результаты испытаний трех методов расчета/калибровки вероятностных прогнозов для трех градаций температуры воздуха (норма, ниже/выше нормы):

1) непараметрического метода с коррекцией смещения (НПКС) (вероятности рассчитываются как относительные частоты попадания членов ансамбля в соответствующие градации модельного климатического распределения);

2) расчета вероятностей на основе байесовского усреднения (ВМА);

3) параметрического метода с коррекцией смещения и стандартного отклонения (ПКСС).

В методе НПКС расчет прогностических вероятностей для заданных градаций осуществляется прямым подсчетом относительных частот попадания в эти градации индивидуальных членов прогностического ансамбля. Для исключения систематических ошибок (коррекции смещения) терцили, как и другие параметры модельного климата, рассчитываются по историческим рядам прогнозов.

В методе ВМА (Raftery et al., 2005) функция плотности прогностического распределения  $p(y)$  определяется как средневзвешенное значение плотностей  $p(y/M_k)$ , построенных для каждого отдельного ансамблевого прогноза, рассматриваемого как самостоятельная модель  $M_k$ . Веса  $p(M_k/y^T)$  соответствуют апостериорным вероятностям каждой модели, отражающим степень ее адекватности данным обучающей выборки  $y^T$ :

$$p(y) = \sum_{k=1}^K p(y/M_k)p(M_k/y^T). \quad (1)$$

Основная идея заключается в том, что для любого прогноза в ансамбле есть «лучший» член (модель), однако заранее не известно какой именно.

Часто искомая прогностическая плотность распределения величины  $y$ , которая оценивается по ансамблю детерминированных прогнозов  $f_k$ , определяется следующим образом:

$$p(y / f_1, \dots, f_K) = \sum_{k=1}^K w_k g_k(y / f_k), \quad (2)$$

где  $g_k(y/f_k)$  — условная плотность распределения  $y$  при принятии прогноза  $f_k$ , а  $w_k$  — апостериорная вероятность того, что прогноз  $f_k$  является лучшим. Веса  $w_k$  неотрицательны, сумма весов  $\sum_{k=1}^K w_k$  равна 1.

Если рассматривается прогноз температуры воздуха, условное распределение  $y/f_k$  можно считать нормальным со средним  $a_k + b_k f_k$  и дисперсией  $\sigma^2$ :

$$y / f_k \sim N(a_k + b_k f_k, \sigma^2). \quad (3)$$

Если прогнозы не были исправлены на смещение, то введение коэффициентов  $a_k$  и  $b_k$  может послужить для коррекции. Эти коэффициенты могут вводиться и для корректированных прогнозов, однако в этом случае допустимо принять их равными единице. Веса  $w_k$  в случае ансамбля прогнозов по одной модели также можно принять равными между собой и равными  $1/K$ , и при этом оценке по обучающей выборке подлежит только один параметр  $\sigma$ . Веса  $w_k$  и  $\sigma$  оцениваются по методу максимального правдоподобия. Для нахождения максимума функции правдоподобия по тренировочным данным используется итерационный EM (expectation—maximization) алгоритм.

В испытаниях метода ВМА было опробовано несколько вариантов модели с введением не корректированных на смещение ансамблевых прогнозов, нахождением коэффициентов  $a_k$  и  $b_k$ , с разными или равными весами для членов ансамбля. Однако результаты показали, что чрезмерное усложнение модели оказывается неоправданным при переходе на независимую выборку. Поэтому здесь будут представлены результаты, полученные при использовании корректированных на смещение ансамблевых прогнозов и равных весов для всех членов ансамбля.

Таким образом, по обучающей выборке оценивалось смещение как средняя разность прогноз—факт, а затем по ансамблю прогнозов, скорректированных на величину смещения, оценивались стандартные отклонения (SD) распределений ансамблевых прогнозов. Смещение и SD оценивались для каждой станции и каждого месяца по 20 годам. Для расчетов SD, аппроксимации прогностического распределения и расчета прогностических вероятностей трех градаций температуры использован *R*-пакет прикладных программ (Fraley et al., 2011).

На рис. 1 показаны примеры вероятностных прогнозов температуры воздуха на основе ВМА для Санкт-Петербурга и Москвы. Из рисунка хорошо видно, как результирующая функция распределения складывается из распределений для каждого индивидуального прогноза. В зависимости от распределения ансамблевых прогнозов вид этой функции может быть разным: близким к нормальному, асимметричным, многомодальным — в этом состоит одно из основных отличий этого метода от параметрического с коррекцией двух параметров.

Метод ПКСС подробно изложен в работе Мирвис и др. (2006). Вероятности попадания прогноза в каждую из градаций рассчитывают исходя из предположения о нормальности прогностического распределения внутри ансамбля на основе калиброванных значений параметров среднего  $\bar{x}$  и стандартного отклонения  $\sigma$ .

Калибровка  $\bar{x}$  состояла в исключении систематических ошибок модели (смещения среднего). Оценка стандартных отклонений включала анализ связей между рассеянием пучка ансамблевых прогнозов по дням и ошибками прогнозов для каждого прогностического периода. На основе перебора определялись наиболее информативные интервалы временного осреднения параметров изменчивости ансамбля. Затем на основе средних отношений ошибок прогнозов к параметрам изменчивости ансамбля, полученных по данным исторических прогнозов для каждой точки и каждого календарного периода, определялись корректирующие коэффициенты к значениям  $\sigma$ .

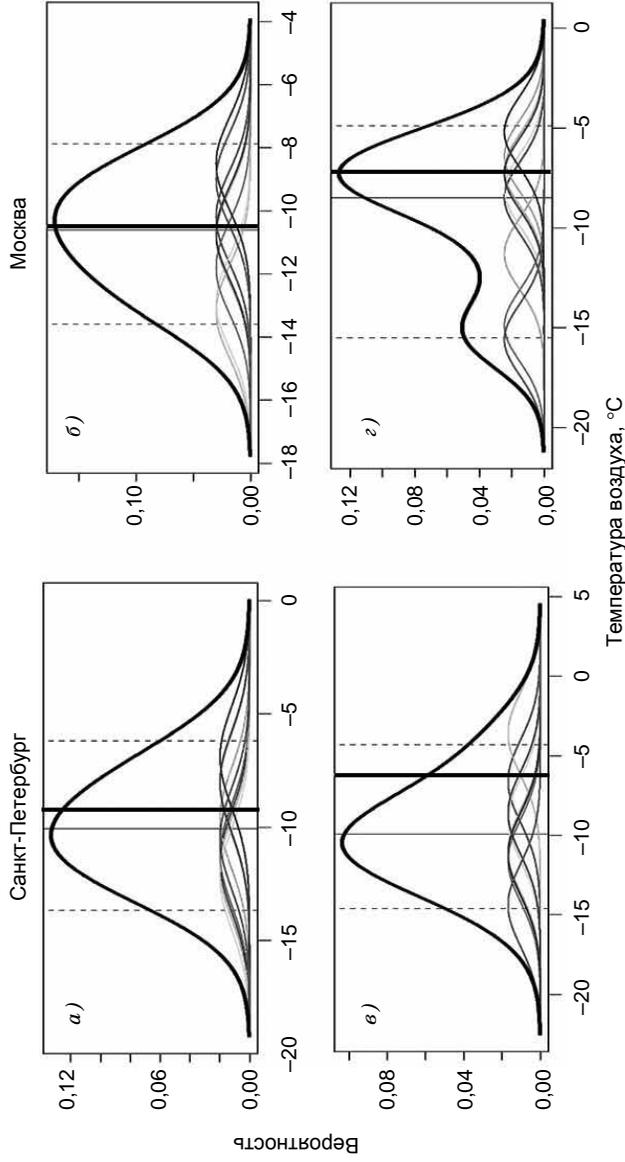


Рис. 1. Пример вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха, рассчитанных на основе ВМА, на январь 1982 г. для Санкт-Петербурга (слева) и Москвы (справа).

Тонкие кривые — распределения индивидуальных прогнозов, жирная черная линия — прогнозическая плотность распределения, тонкие вертикали — прогнозические медианы (сплошная линия) и процентиля 10 и 90 % (пунктир), жирная вертикаль — данные наблюдений.

*а, б* — прогноз на первую неделю; *в, г* — прогноз на месяц.

## Оценки калиброванных вероятностных прогнозов по зависимой выборке

Рассмотрим результаты сравнения вероятностных прогнозов по трем методам, полученные на зависимой выборке исторических прогнозов. Из многочисленных способов оценки прогнозов, предложенных для многоаспектной характеристики их свойств, в работе рассматривались наиболее распространенные:

*диаграмма надежности* — характеризует соответствие предсказанных вероятностей и фактических частот их осуществления в среднем;

*гистограмма повторяемости прогностических вероятностей* — позволяет судить о категоричности прогнозов;

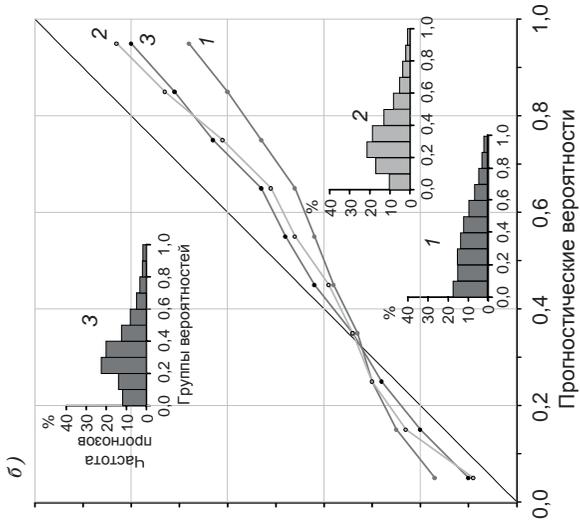
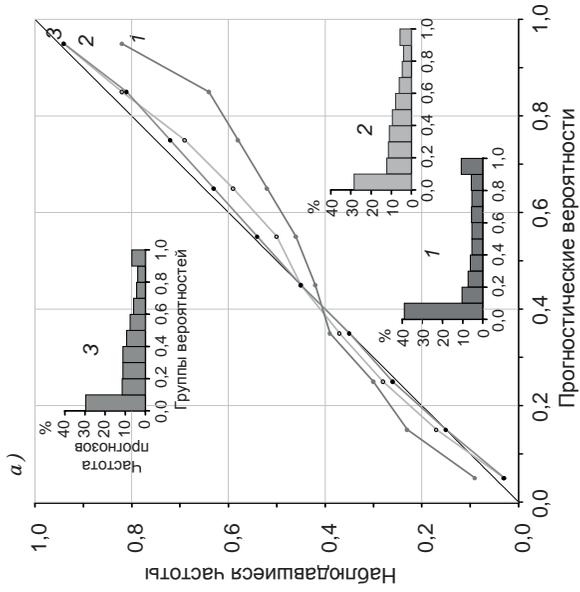
*диаграмма ROC* (relative operating characteristic) — характеризует разрешающую способность прогностической системы в разделении альтернативных результатов прогноза явления (в данном случае реализации заданной градации температуры воздуха) при заданной пороговой вероятности принятия решения;

*интегральный показатель (AROC)*, численно равный площади под кривой ROC.

Отметим, что границы градаций для фактических значений температуры воздуха были определены в каждой точке и для каждого календарного прогностического периода как терцили климатического распределения по данным за 1961—1990 гг.

На рис. 2 представлены диаграммы надежности и гистограммы повторяемости вероятностных прогнозов температуры воздуха на первую, вторую, третью и четвертую недели, полученные по всей совокупности 240 исторических прогнозов на 70 станциях СНГ при использовании методов НПКС, ВМА, ПКСС. Гистограммы относительной частоты прогнозов с заданной градацией вероятности показаны в виде столбчатых диаграмм.

Из рисунка видно, что надежность вероятностных прогнозов для методов ВМА и ПКСС различается очень мало, и при этом она существенно выше, чем при использовании НПКС. Это достигается именно за счет корректировки параметров изменчивости ансамбля, которая в НПКС практически отсутствует. В результате калибровки изменчивости ансамбля диаграмма надеж-



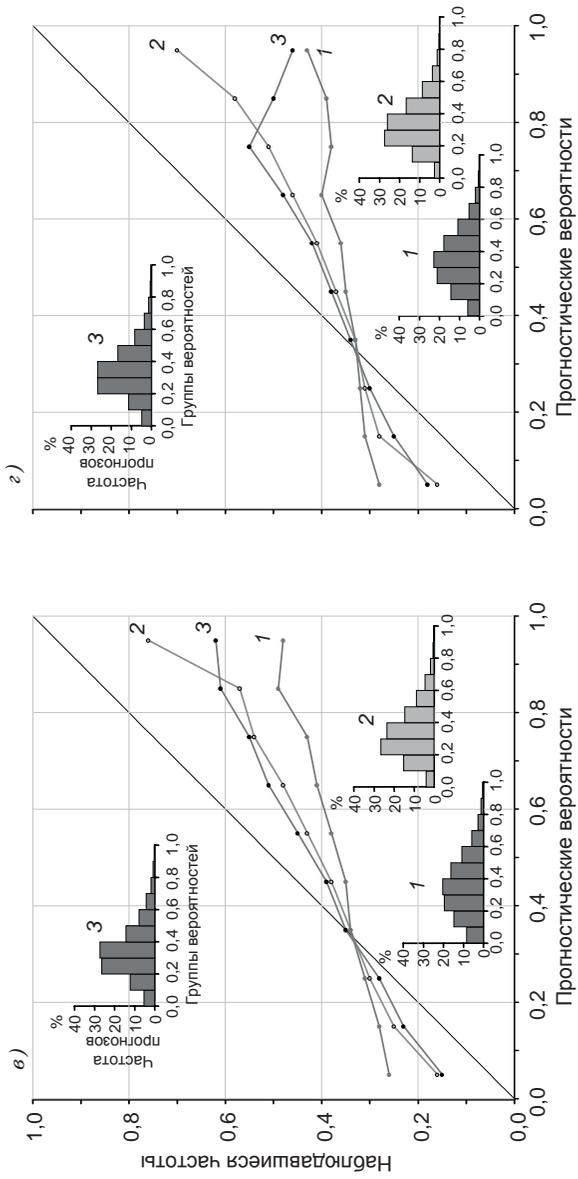


Рис. 2. Диаграммы надежности и гистограммы повторяемости вероятностных прогнозов температуры воздуха на первую (а), вторую (б), третью (в) и четвертую (г) недели прогностического месяца, полученные при использовании различных методов калибровки.

1 — метод НКПС, 2 — метод ВМА, 3 — метод ПКСС.

ности для прогнозов на первую неделю становится близка к идеальной (фактически частоты почти идентичны прогностическим вероятностям). Гистограммы повторяемости прогностических вероятностей для первой недели имеют U-образную форму, что свидетельствует о преобладании прогнозов, близких к категорическим (вероятности нуль или единица). Отметим, что категоричность прогнозов, рассчитанных по методу НПКС, выше, чем прогнозов, рассчитанных по другим методам. Это, однако, не может рассматриваться как достоинство, поскольку приводит к ухудшению диаграммы надежности. Вследствие слабого рассеяния прогнозов в ансамбле неоправданно часто прогностические вероятности оказываются близкими к нулю или единице. По мере увеличения заблаговременности категоричность прогнозов по всем методам уменьшается. Одновременно при этом отмечается уменьшение надежности прогнозов: прогнозы, данные с вероятностями, близкими к нулю или единице, не вполне согласуются с фактическими частотами.

Диаграммы ROC, иллюстрирующие соотношение доли правильных прогнозов (hit rate, HR) и доли ложных тревог (false alarm, FAR) в прогнозах на месяц (четыре недели) при разных уровнях пороговой вероятности, представлены на рис. 3. Замечено, что для всех градаций температуры воздуха и практически для всех пороговых вероятностей наибольшее превышение доли правильных прогнозов получено в методе ПКСС. Хорошо видно также, что наименее определенным оказывается разделение альтернативных исходов в прогнозах градации «норма».

В табл. 1 приведены интегральные показатели (AROC) для всех рассмотренных периодов прогноза. Напомним, что для идеального прогноза значение AROC равно единице. При равенстве HR и FAR для любых пороговых вероятностей кривая на диаграмме ROC совпадает с диагональю квадрата и значение AROC составляет 0,5, что соответствует отсутствию полезной прогностической информации. Оценки AROC показывают, что наилучшие результаты в испытаниях по зависимой выборке получены по прогнозам с применением параметрического метода с коррекцией смещения, включающего выбор оптимальных временных интервалов для оценки разброса ансамбля, и коррекцией стандартных отклонений в ансамбле, приближающей их к уровню прогностических ошибок.

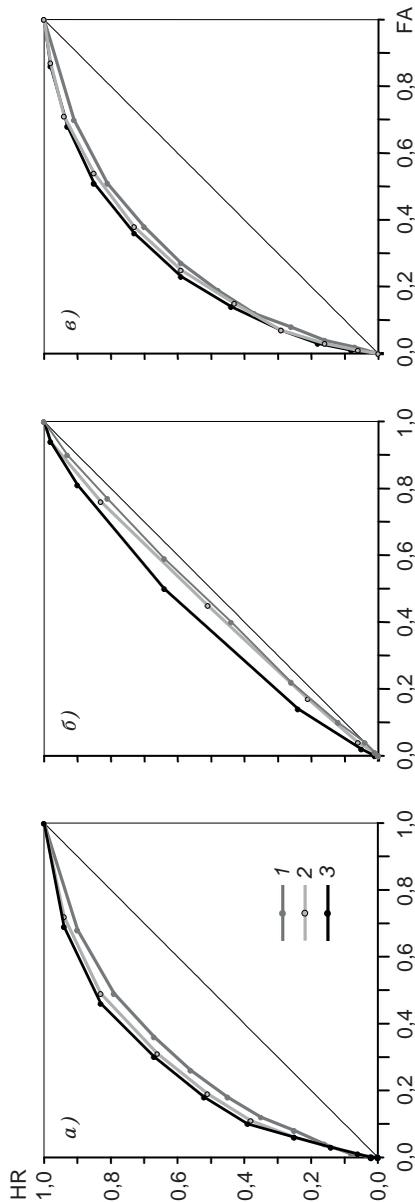


Рис. 3. Диаграммы ROC (соотношение доли правильных прогнозов (HR) и доли ложных тревог (FA)) вероятностных прогнозов трех градаций температуры воздуха на месяц (1—4 недели).

*a* — градация «ниже нормы», *б* — «норма», *в* — «выше нормы».  
 1 — метод ИПКС, 2 — метод ВМА, 3 — метод ПКСС.

Таблица 1

**Оценки AROC исторических вероятностных прогнозов трех градаций приземной температуры воздуха (норма, ниже/выше нормы) с использованием различных методов калибровки ансамблевых расчетов (240 прогнозов по 70 станциям Северной Евразии)**

Период прогноза, недели	Метод расчета вероятностей								
	НПКС	ВМА	ПКСС	НПКС	ВМА	ПКСС	НПКС	ВМА	ПКСС
	<i>Ниже нормы</i>			<i>Норма</i>			<i>Выше нормы</i>		
1	0,860	0,885	0,896	0,682	0,702	0,737	0,842	0,877	0,886
2	0,697	0,710	0,721	0,546	0,544	0,579	0,684	0,705	0,716
3	0,592	0,624	0,636	0,500	0,509	0,541	0,579	0,610	0,623
4	0,544	0,580	0,599	0,509	0,494	0,529	0,537	0,573	0,582
1—4	0,710	0,740	0,753	0,536	0,551	0,595	0,715	0,738	0,750

### Результаты оценок независимых вероятностных прогнозов

Независимый ряд прогнозов рассчитывался с недельным интервалом. Календарные даты прогностических периодов при этом не совпадают с датами прогнозов зависимой выборки. Для расчета необходимых при калибровке параметров и коэффициентов их изменение в годовом ходе было аппроксимировано с помощью Фурье-разложения при учете первых четырех гармоник.

Диаграммы надежности и гистограммы повторяемости вероятностных прогнозов на первую, вторую, третью и четвертую недели, полученные при оценке независимых вероятностных прогнозов по трем методам, представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что выводы полученные по зависимой выборке, полностью подтвердились данными независимых прогнозов. Наилучшее соответствие между предсказанными вероятностями и фактическими частотами отмечается по результатам прогнозов с калибровкой параметров изменчивости ансамблевых распределений по методам ВМА и ПКСС. Различия в оценках этих двух методов минимальны, а надежность прогнозов по методу НПКС существенно хуже.

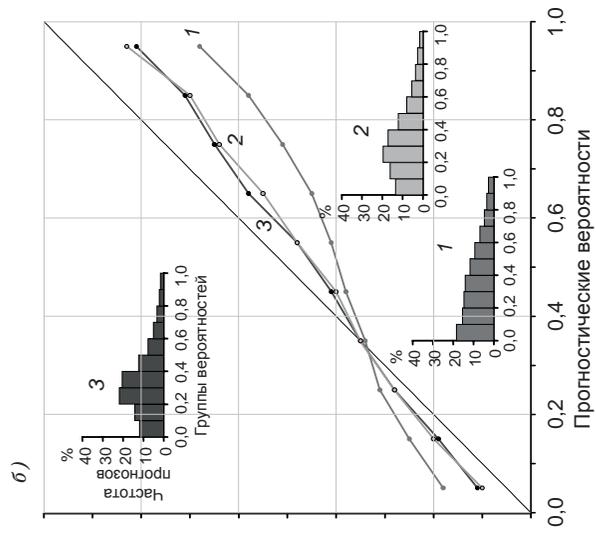
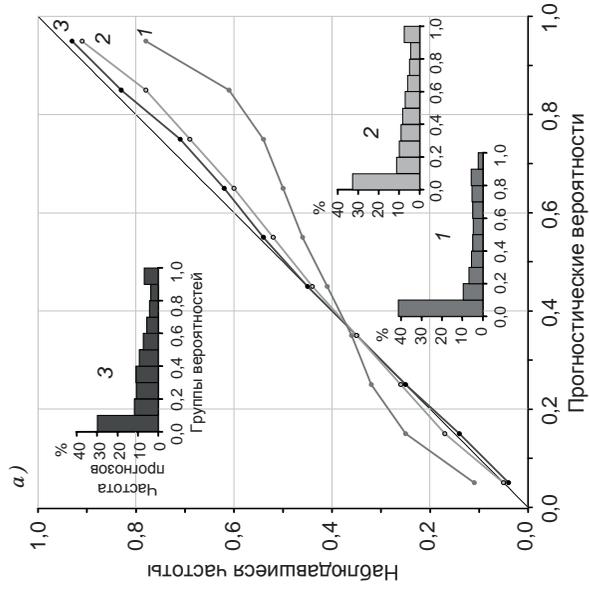
В табл. 2 представлены интегральные оценки AROC, полученные в прогнозах для каждой из градаций температуры воздуха по неделям и на месяцц (1—4 недели) в целом.

Таблица 2

**Оценки AROC еженедельных вероятностных прогнозов трех градаций приземной температуры воздуха (норма, ниже/выше нормы) с использованием различных методов калибровки ансамблевых расчетов по данным независимой выборки**

Период прогноза, недели	Метод расчета вероятностей								
	НПКС	ВМА	ПКСС	НПКС	ВМА	ПКСС	НПКС	ВМА	ПКСС
	<i>Ниже нормы</i>			<i>Норма</i>			<i>Выше нормы</i>		
1	0,856	0,891	0,894	0,662	0,736	0,727	0,826	0,873	0,878
2	0,683	0,714	0,709	0,539	0,605	0,575	0,668	0,707	0,699
3	0,578	0,617	0,605	0,516	0,580	0,543	0,574	0,613	0,606
4	0,539	0,584	0,570	0,508	0,575	0,529	0,535	0,580	0,572
1—4	0,720	0,751	0,739	0,548	0,622	0,600	0,702	0,741	0,735

Результаты сравнения табл. 1 и 2 показывают, что оценки AROC, полученные по зависимой и независимой выборкам, в целом близки. Хорошее согласование этих данных позволяет заключить, что оценки параметров на основе 20-летней обучающей выборки и аппроксимации их годового хода с использованием четырех гармоник Фурье оказываются почти несмещенными. Соотношение между оценками AROC для методов ВМА и ПКСС по независимой выборке неоднозначно: для прогнозов крайних градаций на первую неделю лучшим оказывается метод ПКСС, а в остальных случаях выше оказались оценки прогнозов по методу ВМА. Возможно, это объясняется тем, что в методе ПКСС используется более тонкая настройка по обучающей выборке, которая оказывается не вполне оптимальной при переходе на независимый ряд прогнозов.



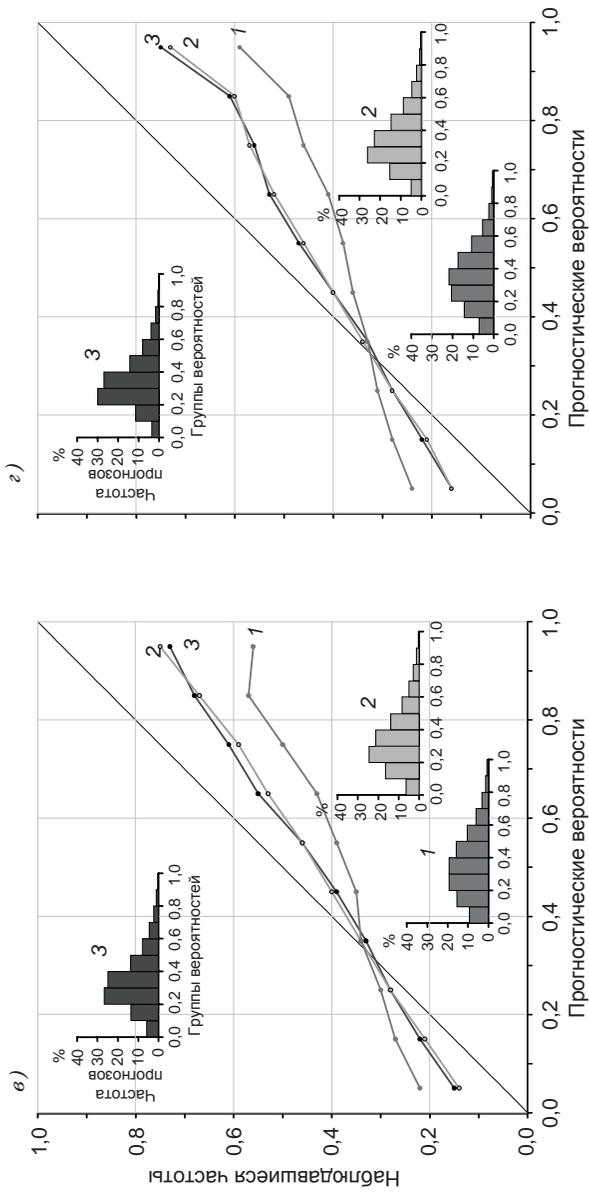


Рис. 4. Диаграммы надежности и гистограммы повторяемости независимых вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха на первую (а), вторую (б), третью (в) и четвертую (г) недели прогноз-ического месяца, полученные при использовании различных методов калибровки по данным зависимой выборки прогнозов.

1 — метод НПКС, 2 — метод ВМА, 3 — метод ПКСС.

## Заключение

Представленные в работе результаты испытания трех методов расчета вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха для территории Северной Евразии показали несомненную целесообразность корректировки прогнозов не только среднего значения, но также и параметров изменчивости прогностического ансамбля. Использование для этого методов ВМА и ПКСС позволяет существенно сблизить прогностические вероятности и соответствующие им фактически наблюдаемые частоты и повысить точность вероятностных прогнозов. При этом существенно повышается также разрешающая способность прогностической системы, оцениваемая с помощью показателя ROC.

Выводы относительно наилучшего подхода делать пока рано. Для двух рассмотренных методов они не вполне однозначны. Кроме того, несомненно, требуется испытать и другие подходы, прежде всего такие как неоднородная гауссовская регрессия (NGR) и логистическая регрессия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Мирвис В. М., Мелешко В. П., Гаврилина В. М., Матюгин В. А., Львова Т. Ю.* (2006). Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов // *Метеорология и гидрология*. № 2. С. 5—16.

*Fraley C., Raftery A. E., Gneiting T., Slaughter J. M., Berrocal V.* (2011). Probabilistic weather forecasting in R // *The R Journal*. V. 3/1. P. 55—62.

*Gneiting T., Raftery A. E. et al.* (2005). Calibrated probabilistic forecasting using ensemble Model Output Statistics and minimum CRPS estimation // *Mon. Wea. Rev.* V. 133. P. 1098—1118.

*Gneiting T., Balabdaoui F., Raftery A. E.* (2007). Probabilistic forecasts, calibration and sharpness // *J. Roy. Statist. Soc. Series B: Statistical Methodology*, 69. P. 243—268.

*Grimit E. P., Mass C. F.* (2007). Measuring the ensemble spread—error relationship with a probabilistic approach: stochastic ensemble results // *Mon. Wea. Rev.* V. 135. P. 203—221.

*Hamill T. M., Colucci S. J.* (1997). Verification of Eta-RSM short-range ensemble forecasts // *Mon. Wea. Rev.* V. 125. P. 1312—1327.

*Hamill T. M., Whitaker J. S., Wei X. (2004).* Ensemble reforecasting: Improving medium-range forecast skill using retrospective forecasts // *Mon. Wea. Rev. V. 132. P. 1434—1447.*

*Hagedorn R., Hamill T. M., Whitaker J. S. (2008).* Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble reforecasts. Part I: Two-meter temperatures // *Mon. Wea. Rev. V. 136. P. 2608—2619.*

*Raftery A. E., Gneiting T., Balabdaoui F., Polakowski M. (2005).* Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles // *Mon. Wea. Rev. V. 133. P. 1155—1174.*

*Roulston M. S., Smith L. A. (2003).* Combining dynamical and statistical ensembles // *Tellus, 55A. P. 16—30.*

*Wang X., Bishop C. H. (2005).* Improvement of ensemble reliability with a new dressing kernel // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131. P. 965—986.*

*Whitaker J. S., Xue Wei, Vitart F. (2006).* Improving week-2 forecasts with multimodel reforecast ensembles // *Mon. Wea. Rev. V. 134. P. 2279—2284.*

*Wilks D. S., Hamill T. M. (2007).* Comparison of Ensemble-MOS methods using GFS reforecasts // *Mon. Wea. Rev. V. 135. P. 2379—2390.*

**ОЦЕНКИ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ ОПЕРАТИВНЫХ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ, СОСТАВЛЕННЫХ  
МЕТОДОМ МНОГОФАКТОРНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ  
СРЕДНЕЙ ДЛЯ ОСНОВНОЙ ЗЕРНОСЕЮЩЕЙ ЗОНЫ РОССИИ  
И СОПРЕДЕЛЬНЫХ СТРАН**

*А. В. Мещерская, М. П. Голод*

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

Поступила в редакцию 21.09.2012

**Введение**

Для составления метеорологических прогнозов разной заблаговременности в оперативном режиме в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова используются три метода. Наиболее современным и перспективным является интенсивно развивающийся гидродинамико-статистический метод прогноза приземных и высотных метеорологических полей для Северного полушария и его регионов. Метод основан на использовании глобальной гидродинамической модели общей циркуляции атмосферы, разработанной в ГГО коллективом авторов под руководством В. П. Мелешко (Шнееров, Мелешко и др., 2001), и статистической интерпретации прогнозов (Мирвис, 2001; Мирвис, Мелешко и др., 2006а, 2006б). Прогнозы составляются на месяц и сезон с заблаговременностью, близкой к нулевой.

Два других метода, используемых в ГГО, являются статистическими — это физико-статистический метод сверхдолгосрочного прогноза средней месячной температуры воздуха для Северного полушария (Борисенков, Борисова, 1981; Борисенков и др., 1997) и метод многофакторной регрессионной средней (МРС) (Мещерская, Голод, 2006; Мещерская и др., 1999). Последний метод можно рассматривать как автоматизированный и упрощенный

вариант комплексного физико-статистического метода сверхдолгосрочного прогноза средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков для основных зернопроизводящих районов на территории бывшего СССР, разработанного ранее под руководством М. И. Юдина (Юдин, 1968; Юдин, Мещерская, 1977; Юдин и др., 1995). Отличительная особенность физико-статистических методов состоит в большой заблаговременности прогнозов. В этом состоит их преимущество, так как подавляющее число разработанных методов прогноза температуры воздуха и осадков относится к прогнозам с нулевой заблаговременностью.

В настоящей работе основное внимание уделено оценкам успешности оперативных сверхдолгосрочных прогнозов средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков, составленных методом МРС в 1998—2011 гг. с заблаговременностью 2—13 мес для основной зерносеющей зоны России и сопредельных стран (Украина, Белоруссия, Казахстан).

## **1. Оценки оправдываемости оперативных сверхдолгосрочных прогнозов средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков, составленных методом многофакторной регрессионной средней**

### ***1.1. Краткая характеристика метода многофакторной регрессионной средней***

Метод МРС является регрессионным. Предиктанты — поля средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков — представлены в виде первых двух коэффициентов разложения по эмпирическим ортогональным функциям (э.о.ф.). Предикторы характеризуют температуру воздуха и приземное давление в Северном полушарии, температуру воды в Северной Атлантике, индексы атмосферной циркуляции по типизации Вангенгейма—Гирса, индексы Северо-Атлантического и Южного колебаний, ледовитость морей в Арктике, характеристики центров действия атмосферы и др. Значительная часть предикторов также представлена в виде коэффициентов разложения по э.о.ф.

Исходный архив данных в совокупности включает 748 потенциальных предикторов при заблаговременности предикторов от нескольких месяцев до года (под заблаговременностью предикторов подразумевается интервал времени между месяцем (годом), к которому относится предиктор и месяцем (годом), к которому относится предиктант; заблаговременность прогноза — это временной интервал между датами составления прогноза и его осуществления). Для еще большего увеличения архива и учета цикличности ряды предикторов смещались назад на срок от одного года до 12 лет. В результате архив потенциальных предикторов увеличился примерно в 12 раз. Предполагается, что вся совокупность предикторов характеризует состояние климатической системы, а ежегодное продление рядов предикторов на год соответствует изменению состояния климатической системы, которое метод МРС должен отразить.

Длина рядов предикторов колеблется от 70 до 110 лет. В соответствии с результатами работы Блажевич и др. (1987) длина исходных рядов предикторов выбрана равной 60 годам для прогноза температуры воздуха и 70—80 годам для прогноза осадков.

Отбор значимых корреляционных связей (значимых предикторов) проводился по критерию  $|z/\sigma_z| \geq 2,7$ , что при длине рядов, равной 70 годам, соответствует коэффициенту корреляции  $|r| \geq 0,31$  (здесь  $z$  — преобразование Фишера, а  $\sigma_z$  — среднее квадратическое отклонение  $z$ ). Дополнительно использовался критерий  $|z/\sigma_z| \geq 3,5$ . В работе Блажевич и др. (1987) было показано, что ужесточение критерия отбора корреляционных связей не привело к повышению оправдываемости прогнозов. По-видимому, это объясняется недостаточным числом значимых связей (табл. 1) и большей смещенностью больших значений коэффициентов корреляции, когда вероятность отбора случайных связей возрастает.

В табл. 1 в качестве примера приведено число значимых предикторов  $N$  для прогноза на апрель 2003 г. первого коэффициента разложения по э.о.ф. средней месячной температуры воздуха при двух критериях отбора. Расчет  $N$  выполнен с исключением связанных предикторов, которое состояло в исключении одного из пары предикторов, если коэффициент корреляции между ними превышал 0,6. Без исключения связанных предикторов их число возрастает на 30—40 %.

Таблица 1

**Число значимых предикторов  $N$  и накопленные суммы числа значимых предикторов  $L$  ( $\Sigma N$ ) для прогноза на апрель 2003 г. первого коэффициента разложения ( $a_1$ ) по э.о.ф. средней месячной температуры воздуха в основной зерносеющей зоне России и сопредельных стран (с исключением связанных предикторов ( $r \geq 0,6$ ))**

		Заблаговременность ( $\tau$ ) значимых предикторов, число лет											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		$z/\sigma_z \geq 2,7$											
$N$	26	23	23	5	21	6	12	15	12	12	12	11	
$\Sigma N$	26	49	72	77	98	104	116	131	143	155	170	181	
		$z/\sigma_z \geq 3,5$											
$N$	2	2	3	1	2	1	1	2	2	1	1	0	
$\Sigma N$	2	4	7	8	10	11	12	14	16	17	18	18	

Анализ таблицы показывает, что при  $|z/\sigma_z| \geq 2,7$  наибольшее число значимых связей ( $N$ ) соответствует небольшим значениям заблаговременности предикторов ( $\tau$ ) и равно 23—26 при  $\tau = 1...3$  года. Накопленные суммы числа значимых связей ( $\Sigma N$  или  $L$ ), естественно, возрастают с увеличением сумм заблаговременностей. В приведенном примере на всем интервале заблаговременности ( $\tau = 1...12$  лет) выделилась 181 значимая связь. При таком большом числе значимых связей расчет прогностических значений предиктантов затрудняется. Использование множественных уравнений регрессии становится некорректным. В связи с этим прогностические значения предиктантов рассчитываются как средние из решений одномерных уравнений регрессии. Их число равно числу значимых связей на выбранных интервалах заблаговременностей предикторов. Прогностические значения предиктантов рассчитываются по двум формулам, обоснование которых приведено в работе Мещерской и др. (1999).

Составление долгосрочных прогнозов завершается построением прогностических карт средней месячной температуры воздуха за все месяцы года и карт месячных сумм осадков за месяцы теплого периода.

## ***1.2. Оценки оправдываемости сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов, составленных методом многофакторной регрессионной средней***

### ***1.2.1. Оценки оправдываемости оперативных прогнозов средней месячной температуры воздуха***

Успешность оперативных прогнозов средней месячной температуры воздуха оценивалась по четырем показателям: доле ( $P$  %) оправдавшихся прогнозов и оценкам по знаку ( $\rho$ ) согласно Наставлению по службе прогнозов (1986), а также по коэффициенту корреляции ( $r$ ) между прогностическими и фактическими полями аномалий температуры воздуха и по средней квадратической ошибке прогнозов ( $\delta$  или RMSE).

Прогнозы температуры воздуха рассчитывались для месяцев теплого периода (апрель—сентябрь) в 1998—2011 гг. с заблаговременностью 2—7 мес, а для месяцев холодного периода (октябрь—март) с зимы 2001/02 г. до зимы 2010/11 г. с заблаговременностью 8—13 мес. Разная заблаговременность прогнозов для теплого и холодного периода, которые составляют в феврале, определяется тем, что для обоих периодов исходная информация (предикторы) отсекалась по январь текущего года. При этом заблаговременность прогнозов на апрель составляет 2 мес, возрастающая до 13 мес при прогнозе на март следующего года.

Оправдываемость прогнозов средней месячной температуры воздуха по  $P$  и  $\delta$  сравнивалась с оправдываемостью климатических прогнозов, рассчитанных за 1961—1990 г., в соответствии с рекомендациями ВМО.

### ***Оценки оправдываемости оперативных прогнозов температуры воздуха по доле оправдавшихся прогнозов ( $P$ )***

На рис. 1 *a* и в табл. 2 приведено число оправдавшихся методических и климатических прогнозов ( $P$  %) средней месячной температуры воздуха за теплый период. Средние за 14 лет оценки оперативных прогнозов составили 68,7 %, климатических — 65,8 %, т. е. успешность методических прогнозов на 2,9 %

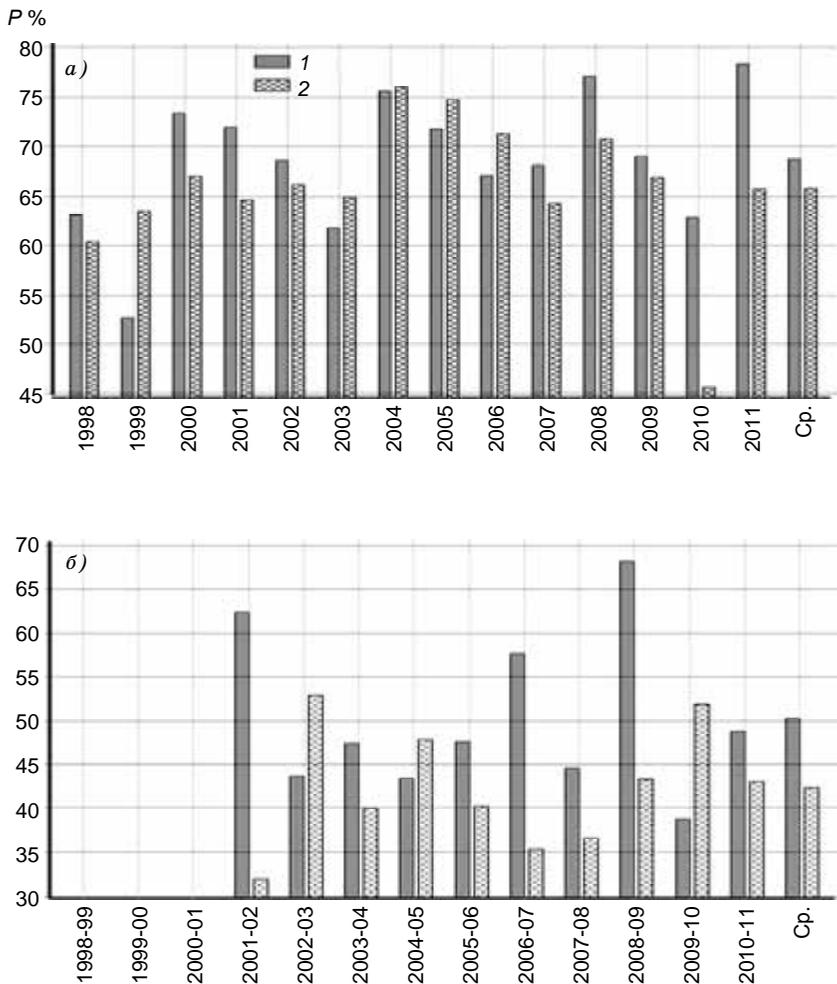


Рис. 1. Оценки успешности ( $P$ ) оперативных долгосрочных прогнозов средней месячной температуры воздуха, рассчитанных методом МРС на теплый (*а*) и холодный (*б*) период, и климатических прогнозов температуры для основной зерносеющей зоны России и сопредельных стран.

1 — методический прогноз, 2 — климатический.

Таблица 2

Оценки долгосрочных оперативных прогнозов средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков, составленных методом многофакторной регрессионной средней на 1998—2011 гг.

Показатель	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Среднее
<i>Температура воздуха, теплый период (апрель—сентябрь)</i>															
$P$ %	63,1	52,7	73,4	72,0	68,6	61,7	75,6	71,8	67,1	68,1	77,1	69,0	62,8	78,4	68,7
$P_{\text{кл}}$ %	60,4	63,5	67,0	64,6	66,2	64,9	76,0	74,7	71,3	64,2	70,8	66,9	45,7	65,7	65,8
$\rho$	0,19	0,06	0,18	0,40	0,17	-0,08	0,29	0,24	0,14	0,27	0,39	0,32	0,31	0,48	0,24
$r$	0,15	-0,04	0,09	0,48	0,33	-0,16	0,16	0,19	0,28	-0,07	0,16	0,38	0,04	0,39	0,17
$\delta$	2,3	2,4	1,8	1,8	1,9	2,2	1,6	1,3	1,9	2,1	1,8	1,9	2,3	1,6	1,9
<i>Температура воздуха, холодный период (октябрь—март)</i>															
$P$ %				62,4	43,6	47,4	43,4	47,6	57,7	44,6	68,2	38,7	48,8	50,2	
$P_{\text{кл}}$ %				31,9	52,9	39,9	47,8	40,2	35,3	36,5	43,3	51,8	43,0	42,3	
$\rho$				0,29	0,06	0,15	0,23	0,05	0,37	0,08	0,66	-0,17	0,31	0,21	
$r$				0,47	0,14	0,16	-0,18	0,55	-0,17	0,03	0,38	0,02	0,29	0,17	
$\delta$				3,8	3,3	3,0	3,2	3,3	4,1	3,8	2,2	4,0	3,3	3,4	
<i>Месячная сумма осадков, теплый период (апрель—сентябрь)</i>															
$P$ %	61,9	60,2	63,9	66,9	68,0	63,2	72,3	69,4	69,1	69,8	68,1	63,6	65,4	68,1	66,4
$P_{\text{кл}}$ %	65,3	63,7	67,4	65,8	62,1	70,9	73,9	72,1	72,5	72,4	70,8	66,4	66,2	68,1	68,4
$\rho$															
$r$	0,01	-0,12	-0,08	0,23	0,25	-0,07	0,04	0,20	0,01	-0,01	0	0,19	0,09	0,08	0,06
$\delta$	53	54	51	47	53	54	44	42	46	54	46	46	48	53	49,4

превышала успешность климатических. Необходимо обратить внимание на очень низкую оценку по  $P$  климатических прогнозов в 2010 г. (самом засушливом за последние 120 лет), когда в мае—июне засуха охватила 52 % территории основных зерносеющих районов на европейской части России (Мещерская и др., 2011). При этом (см. рис. 1 а) методические прогнозы температуры за теплый период года оказались в 2010 г. существенно более успешными ( $P = 62,8$  %), чем климатические ( $P = 45,7$  %).

Еще один результат, заслуживающий упоминания, состоит в том, что за первые семь лет (1998—2004 гг.) средние оценки успешности прогнозов температуры как по показателю  $P$  (66,7 %), так и по другим показателям, приведенным в работе Мещерской и Голод (2006), ниже оценок за вторые семь лет (2005—2011 гг.), когда  $P = 70,6$  %. Увеличение успешности прогнозов во второй половине рассматриваемого периода (1998—2011 гг.), вероятно, следует отнести за счет улучшения методики, поскольку успешность климатических прогнозов от первого периода ( $P_{кл} = 66,1$  %) ко второму ( $P_{кл} = 65,6$  %) изменилась мало.

Для холодной половины года за 12 лет (см. табл. 2) оправдываемость оперативных прогнозов средней месячной температуры воздуха по показателю  $P$  намного ниже, чем для теплой половины года, и равна в среднем 50,2 % (рис. 1 б) при большей заблаговременности. В первую очередь, это связано с годовым ходом изменчивости (среднего квадратического отклонения  $\sigma$ ) средней месячной температуры воздуха. Известно, что на территории России годовой ход среднего квадратического отклонения средней месячной температуры воздуха имеет максимум зимой и минимум летом. Например, в Санкт-Петербурге (Климат Санкт-Петербурга, 2010) значения  $\sigma$  уменьшаются от 5,7 °C в январе до 2,7 °C в июле.

В Наставлении по службе прогнозов (1986) при расчете доли оправдавшихся прогнозов ( $P$  %) годовой ход среднего квадратического отклонения средней месячной температуры воздуха не учитывается, чем и объясняются значительный годовой ход оценок по показателю  $P$  и низкие оценки прогнозов температуры воздуха зимой (рис. 2 а). Дополнительным фактором, определяющим более низкий уровень успешности прогнозов температуры воздуха зимой, может быть их большая заблаговременность.

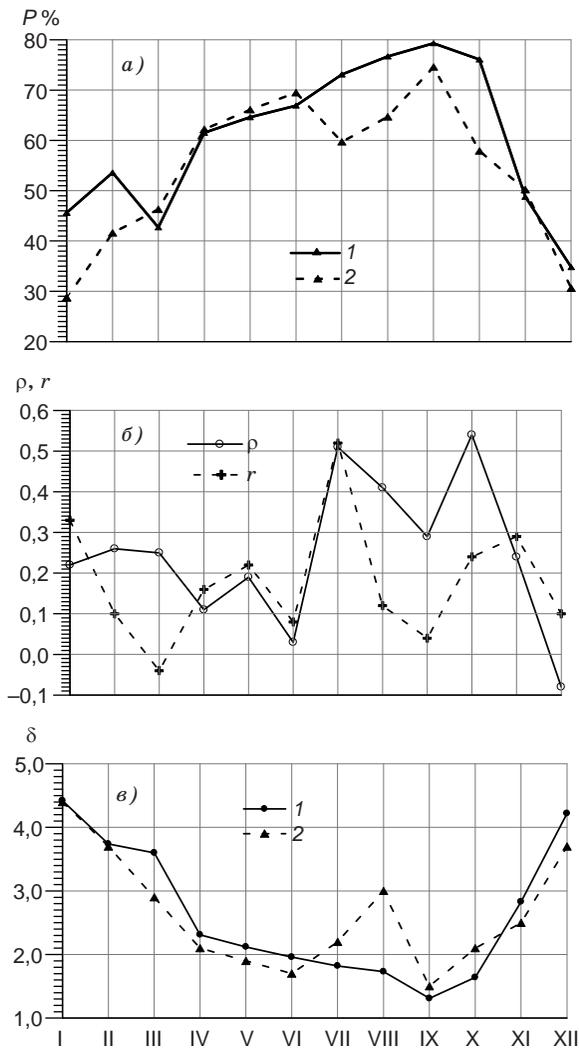


Рис. 2. Годовой ход оценок успешности по показателям  $P$  (а),  $\rho$  и  $r$  (б) и  $\delta$  или RMSE (в) оперативных долгосрочных прогнозов средней месячной температуры воздуха, рассчитанных методом MPC, и климатических прогнозов температуры воздуха (для оценок по  $P$  и RMSE).

1 — методический прогноз, 2 — климатический.

Из анализа рис. 2 а также следует, что оправдаемость по показателю  $P$  методических оперативных прогнозов во все месяцы года, кроме марта, мая и июня, выше оправдываемости климатических прогнозов. В особенности это относится к центральным зимним (январь, февраль) и летне-осенним месяцам (июль—октябрь). В среднем за холодную половину года в период 2001—2011 гг. оправдываемость методических прогнозов по показателю  $P$  на 7,9 % выше оправдываемости климатических прогнозов (см. табл. 2).

*Оценки прогнозов по знаку ( $\rho$ ) и коэффициенту корреляции ( $r$ ) между прогностическими и фактическими полями аномалий средней месячной температуры воздуха*

Соответствующие оценки приведены в табл. 2 и на рис. 3. Оценки прогнозов температуры воздуха по знаку ( $\rho$ ) почти во все годы положительны и в среднем равны 0,24 в теплый период года (см. рис. 3 а) и 0,21 в холодный (см. рис. 3 б). Оценки по  $r$  в среднем равны 0,17 и в холодный, и в теплый период.

В годовом ходе (см. рис. 2 б) более высокими значениями  $\rho$  выделяются летне-осенние месяцы (июль—октябрь), когда  $\rho = 0,3...0,5$ . Во все остальные месяцы, кроме декабря, значения  $\rho$  колеблются от 0,03 до 0,28. Оценки по коэффициенту корреляции менее устойчивы и чаще ниже оценок по знаку.

Оценки по показателям  $\rho$  и  $r$  не зависят от годового хода изменчивости температуры воздуха и в этом смысле более репрезентативны, чем оценки по показателям  $P$  и  $\delta$ .

*Оценки оперативных прогнозов средней месячной температуры воздуха по величине средних квадратических ошибок ( $\delta$  или  $RMSE$ )*

Значения  $\delta$  для оперативных прогнозов температуры воздуха за теплый и холодный период года по годам представлены на рис. 4 и в табл. 2, а их годовой ход — на рис. 2 в. Годовой ход  $\delta$  выражен очень четко, поэтому средние значения  $\delta$  (см. рис. 4) за холодный период года (3,4 °C) в два раза больше, чем за теплый (1,7 °C).

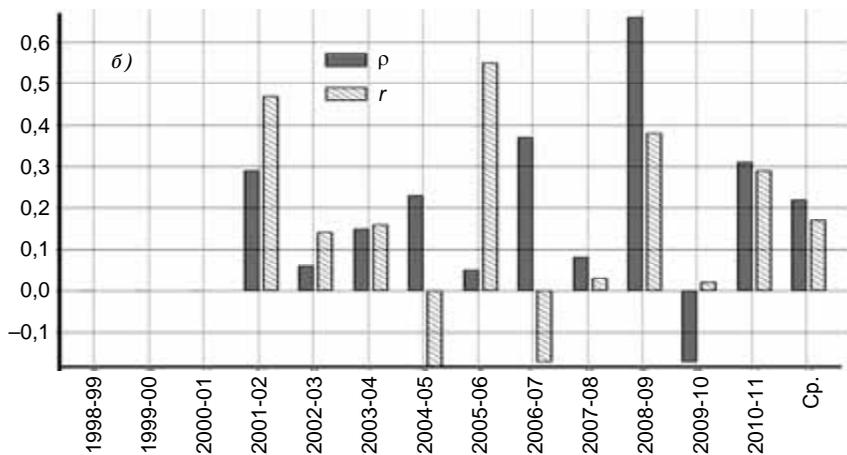
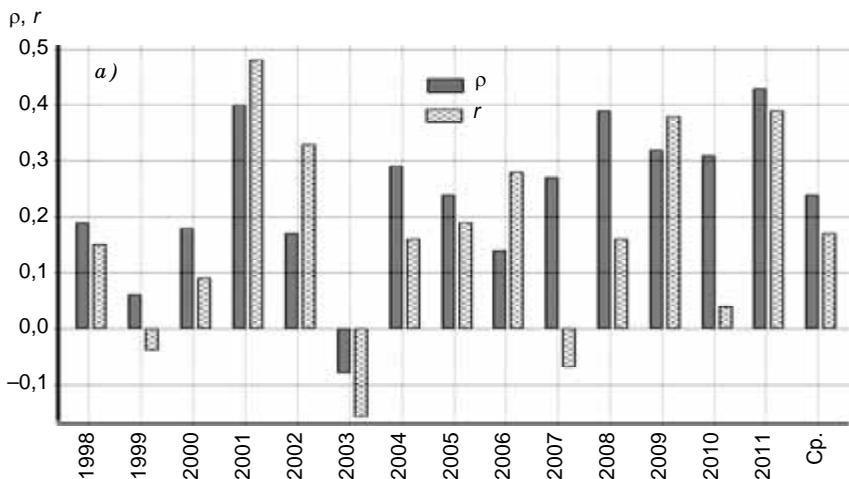


Рис. 3. Оценки успешности по знаку ( $\rho$ ) и коэффициенту корреляции ( $r$ ) оперативных долгосрочных прогнозов средней месячной температуры воздуха, рассчитанных методом МРС на теплый (*a*) и холодный (*б*) период года для основной зерносеющей зоны России и сопредельных стран.

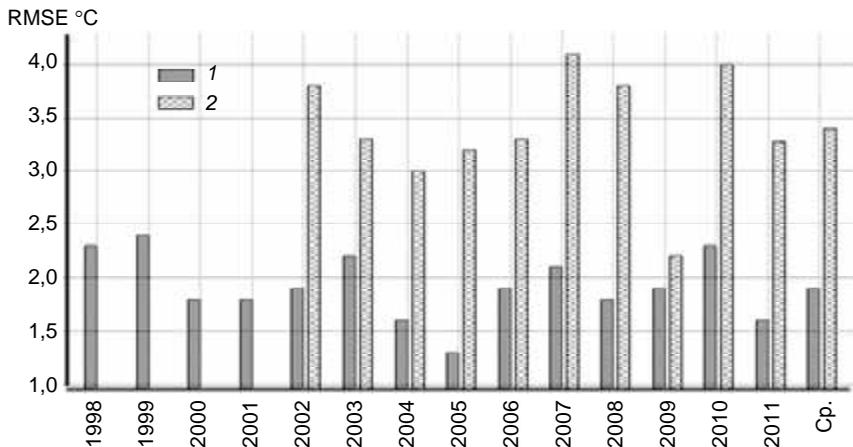


Рис. 4. Оценки успешности (RMSE) оперативных долгосрочных прогнозов средней месячной температуры воздуха, рассчитанных методом MPC, за теплый (1) и холодный (2) период года.

В годовом ходе средние квадратические ошибки ( $\delta$ ) методических и климатических прогнозов достаточно близки (см. рис. 2 в) при более сглаженном годовом ходе величины  $\delta$  методических прогнозов.

В итоговой табл. 3 приведены средние за год оценки прогнозов температуры воздуха по показателям  $r$ ,  $\rho$  и  $\delta$ , составленных методом MPC на 1998—2011 гг. За этот период для метода MPC показатели составили:  $r = 0,17$ ;  $\rho = 0,22$ ;  $\sigma = 2,55$  °C.

Таблица 3

**Средние за год оценки оправдываемости оперативных долгосрочных прогнозов средней месячной температуры воздуха, составленных методом многофакторной регрессионной средней для основной зерносеющей зоны СНГ**

Период	Заблаговременность	$r$	$\rho$	RMSE
2000—2010	2—13 мес	0,17	0,22	2,55

Заблаговременность прогнозов находится за пределами предсказуемости (две недели). Последнее обстоятельство, по-видимому, является определяющим и подтверждает низкую (но не нулевую) оправдываемость прогнозов средней месячной температуры воздуха при большой заблаговременности прогнозов.

### *1.2.2. Оценки оправдываемости оперативных сверхдолгосрочных прогнозов месячных сумм средних областных осадков*

Прогнозы месячных сумм средних областных осадков составлялись методом МРС в период 1998—2011 гг. только для теплого периода с заблаговременностью от 2 до 7 мес. Доля оправдавшихся прогнозов осадков ( $P_{oc}$  %) оценивалась по трем градациям согласно Наставлению по службе прогнозов (1986); кроме того, рассчитывались оценки прогнозов по коэффициенту корреляции ( $r$ ) между прогностическими и фактическим полями аномалий осадков и по средней квадратической ошибке ( $\delta$ ) (см. табл. 2).

На рис. 5 приведены оценки методических и климатических прогнозов осадков по показателю  $P_{oc}$  за 14 лет. В среднем оправдываемость методических прогнозов на 2,0 % ниже оправдываемости климатических. Снижение успешности прогнозов осадков после 2008 г. в какой-то мере может быть связано с уменьшением территории прогноза из-за возникших трудностей с получением фактических данных для Украины, Белоруссии и Северного Казахстана. С 2007 г. прогнозы средних областных осадков составлялись только для основных зерносеющих районов России.

Преимущество климатических прогнозов осадков перед методическими четко прослеживается также в оценках для отдельных месяцев (рис. 6). Наибольшей разность в оценках по показателю  $P_{oc}$  климатических и методических прогнозов осадков оказалась в мае (4,5 %).

Коэффициенты корреляции между прогностическими и фактическими полями аномалий осадков в среднем мало отличаются от нуля ( $r = 0,06$ ), а средние квадратические ошибки близки к 50 %, так что целесообразность составления прогнозов месячных

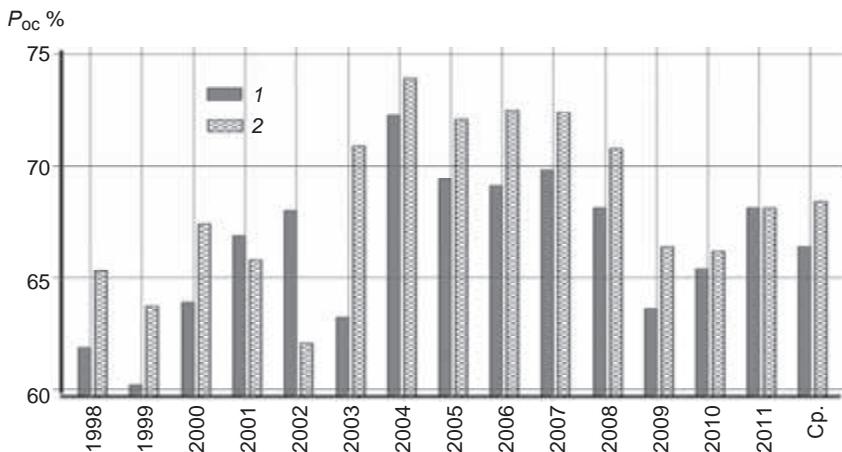


Рис. 5. Оценки успешности оперативных сверхдолгосрочных прогнозов месячных сумм осадков ( $P_{oc}$ ), рассчитанных методом МРС, и климатических прогнозов осадков на теплый период 1998—2011 гг. для основной зерносеющей зоны России и сопредельных стран.

1 — методический прогноз, 2 — климатический.

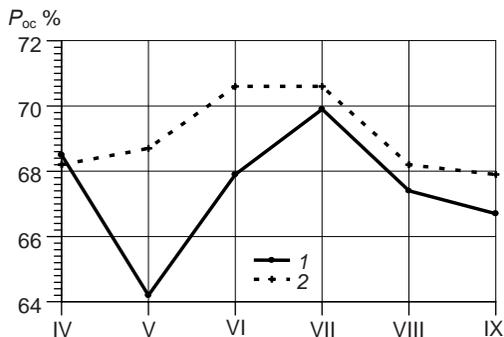


Рис. 6. Временной ход оценок успешности оперативных долгосрочных прогнозов осадков ( $P_{oc}$ ), рассчитанных методом МРС, и климатических прогнозов осадков на теплый период (апрель—сентябрь) 1998—2011 гг. для основной зерносеющей зоны России и сопредельных стран.

1 — методический прогноз, 2 — климатический.

сумм осадков с большой заблаговременностью сомнительна в отличие от прогнозов средней месячной температуры воздуха.

В заключение надо отметить, что сверхдолгосрочные прогнозы средней месячной температуры воздуха имеют ряд преимуществ перед климатическими «прогнозами». В среднем за 14 лет оценки по показателю  $P$  методических прогнозов выше, чем климатических, на 2,9 % для теплой половины года и на 7,9 % для холодной (для холодной половины года оперативные прогнозы составлялись в течение 11 лет). Оценки методических и климатических прогнозов средней месячной температуры воздуха близки по средним квадратическим ошибкам.

Оценки по знаку ( $\rho$ ) и коэффициенту корреляции ( $r$ ) между прогностическими и фактическими полями аномалий средней месячной температуры воздуха существенно выше нуля. В среднем значение  $\rho$  составляет 0,24 и 0,21 за теплый и холодный период соответственно, а  $r = 0,17$  и в теплый, и в холодный период.

Иногда предлагается вместо методических сверхдолгосрочных прогнозов температуры воздуха использовать климатические прогнозы. Приведенные выше оценки прогнозов показывают, что это нецелесообразно даже с учетом возможного влияния потепления климата на оценки прогнозов. При ориентации на климатические прогнозы теряются сведения о географическом распределении ожидаемых аномалий температуры. Оценки по показателям  $\rho$  и  $r$ , хотя и невелики, но показывают, что методические прогнозы несут дополнительную прогностическую информацию (напомним, что для климатических прогнозов  $\rho = 0$  и  $r = 0$ ).

Сверхдолгосрочные прогнозы средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков по методу МРС высылаются дважды в год в Гидрометцентр России для составления комплексного прогноза, а также в ряд учреждений Росгидромета и других ведомств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Блажевич В. Г., Мещерская А. В., Юдин М. И.* (1987). Статистическая оценка информативности предикторов в зависимости от длины исходных рядов / Труды V Всесоюзного совещания по применению статистических методов в метеорологии. С. 44—48.

*Борисенков Е. П., Борисова Л. Е. (1981).* Уточненная физико-статистическая схема сверхдолгосрочного прогноза средних месячных аномалий температуры воздуха для Северного полушария // Труды ГГО. Вып. 443. С. 9—11.

*Борисенков Е. П., Григор О. Ю., Образцова М. З. (1997).* Анализ оправдываемости оперативных сверхдолгосрочных прогнозов аномалий средней месячной температуры воздуха и осадков // Труды ГГО. Вып. 544. С. 124—130.

Климат Санкт-Петербурга и его изменения (2010) // Под ред. В. П. Мелешко, А. В. Мещерской и Е. И. Хлебниковой. — СПб, изд. ГГО. 254 с.

*Мещерская А. В., Голод М. П. (2006).* Оценки ретроспективных и оперативных прогнозов средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков, составленных с большой заблаговременностью методом многофакторной регрессионной средней / Инф. сб. № 33: Результаты испытания новых и усовершенствованных методов и технологий гидрометеорологических прогнозов. — М.: Метеоагентство, с. 3—12.

*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.

*Мещерская А. В., Чувашина И. Е., Маргасова В. Г., Голод М. П. (1999).* Многофакторный регрессионный метод долгосрочных метеорологических прогнозов большой заблаговременности / В сб.: Современные исследования Главной геофизической обсерватории (к 150-летию со дня основания). Т. 1. — СПб: Гидрометеоиздат, с. 51—69.

*Мирвис В. М. (2001).* Оценка и коррекция систематических ошибок гидродинамического прогноза приземной температуры воздуха на месяц для сети станций СНГ // Труды ГГО. Вып. 550. С.155—165.

*Мирвис В. М., Мелешко В. П., Гаврилина В. М., Матюгин В. А., Львова Т. Ю. (2006).* Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. I. Категорические прогнозы — результаты 26-летних серий испытаний // Метеорология и гидрология. № 1. С. 5—18.

*Мирвис В. М., Мелешко В. П., Гаврилина В. М., Матюгин В. А., Львова Т. Ю. (2006).* Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов // Метеорология и гидрология. № 2. С. 5—16.

Наставление по службе прогнозов. Раздел 2, часть VI. — М.: Гидрометеоиздат, 1986. 28 с.

*Шнееров Б. Е., Мелешко В. П. и др. (2001).* Современное состояние глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-2) // Труды ГГО. Вып. 550. С. 3—43.

*Юдин М. И. (1968).* Физико-статистический метод долгосрочных прогнозов погоды. — Л.: Гидрометеоиздат. 28 с.

*Юдин М. И., Мещерская А. В. (1977).* Комплексный физико-статистический метод прогноза большой заблаговременности // Метеорология и гидрология. № 1. С. 3—12.

*Юдин М. И., Мещерская А. В., Блажевич В. Г., Чувашина И. Е., Мирвис В. М. (1995).* Усовершенствование методики и оценки успешности долгосрочных метеорологических прогнозов, составляемых комплексным физико-статистическим методом / В сб.: Проблемы долгосрочного прогноза и короткопериодных колебаний климата, совершенствование обеспечения потребителей этой продукцией. — СПб: Гидрометеоиздат, с. 3—20.

**ГАЗООБМЕН ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ БАРЕНЦЕВА МОРЯ  
(МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ С УЧЕТОМ ПЕРЕНОСА ГАЗА  
ПУЗЫРЬКАМИ ПРИ ШТОРМЕ)**

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

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

Поступила в редакцию 28.08.2012  
Поступила после доработки 20.10.2012

**Введение**

Газоперенос через поверхность Баренцева моря (БМ) привлекает внимание исследователей в связи с наблюдаемым и предполагаемым в дальнейшем значительным потеплением Арктики в XXI веке. Потепление неизбежно должно проявиться в изменениях процессов газообмена, определяющих экологическую обстановку региона. За последнее десятилетие выполнен ряд исследований эволюции климата в регионе Баренцева моря как на основе наблюдений (O'Brien et al., 2007; Levitus et al., 2009; Gulev et al., 2009; Borges et al., 2006), так и на основе климатических моделей разного масштаба (Furevik et al., 2002; Keup-Thiel et al., 2006; Petoukhov, Semenov, 2009; Smedsrut et al., 2010), в том числе и региональных климатических моделей (РКМ).

Количественные оценки газообмена через поверхность как БМ, так и других окраинных морей остаются в настоящее время весьма неопределенными. Отмечается, что для отдельных районов Мирового океана даже знак потока  $\text{CO}_2$  не определяется достаточно надежно (Gulev et al., 2009). Естественно, что при определении изменения потоков углекислого газа и кислорода, связанного с изменением климатических характеристик, степень

неопределенности существенно возрастает. Считается, что поступление  $\text{CO}_2$  из атмосферы в воды БМ под влиянием изменения климата может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от сочетания интенсивности физических процессов, определяющих эволюцию газообмена. Первоочередной задачей остается, таким образом, более ясное понимание физических эффектов, под влиянием которых формируется газоперенос между поверхностью моря и атмосферой. По современным представлениям, сток углерода в окраинные арктические моря, к которым принадлежит и БМ, сравним со стоком в Атлантический океан севернее 60-й параллели (Bates and Mathis, 2009).

В глобальном балансе углерода, по общим представлениям вклад Баренцева моря не слишком велик, однако прогнозируемые в XXI веке изменения климата могут существенно сказаться как на глобальном балансе, так и, в особенности, на структуре вод БМ.

При прогнозе изменений потоков газа через водную поверхность обычно принимаются во внимание следующие основные физические эффекты: изменение температуры воды, уменьшение площади ледового покрова, изменение циркуляции водных масс, поступающих из Атлантического океана. Изменение циркуляции обычно учитывается при расчетах потоков газа через изменение температуры воды отдельных участков моря. Между тем, исследования последних десятилетий показали, что одним из наиболее заметных факторов воздействия на газообмен вода—воздух являются скорость ветра и обрушение волн при сильных ветрах. Это обстоятельство подчеркивается в выводах подробного обзора исследований по газообмену (Wanninkhof et al., 2009) наряду с отсутствием достаточно надежных методов оценки указанных эффектов. При этом в обзоре Wanninkhof et al. (2009) обсуждаются только методы оценки потоков газа через перепад концентрации газа на поверхности раздела и коэффициент газообмена.

Очевидно, что при расчетах среднего климатического газообмена атмосферы с водной поверхностью необходимо учитывать особенности газообмена при сильных ветрах, повторяемость которых достаточно велика над акваторией БМ и изменяется в ходе эволюции глобального и регионального климата. В работах Борт-

ковского (Bortkovskii, 2002; Бортковский, 2006) предложена и подробно описана модель газообмена (МГО), основанная на численном решении системы уравнений гидро- и термодинамики верхнего слоя океана, которая дополнена уравнениями переноса для кислорода и углекислого газа. Представляет интерес использование этой модели для выполнения расчетов в узлах регулярной сетки, наложенной на акваторию БМ, с использованием климатических характеристик, являющихся выходными данными РКМ и глобальной климатической модели (ГКМ), а также данными реанализа.

Целью настоящей работы является анализ чувствительности расчетных значений потоков  $O_2$  и  $CO_2$  через поверхность БМ к изменению климатических параметров по акватории на основе модельных оценок температуры поверхности воды, распределения солености, средней сезонной скорости ветра и положения границы ледового покрова с помощью региональной климатической модели (РКМ) ГГО (Школьник и др., 2000), данных ГКМ и реанализа. Для оценки диффузионного газообмена и газообмена пузырьками при шторме использована уточненная версия МГО вода—воздух (Бортковский, 2006).

## 1. Модели и входные данные

Для решения задачи о распределении газообмена по акватории БМ используются несколько наборов входных данных на регулярной сетке, позволяющих получить распределение потоков газа с помощью МГО. Одно из решений основано на использовании системы разномасштабных моделей (ГКМ + РКМ + МГО), при котором обеспечивается последовательный переход от характеристик, осредненных по ячейке ГКМ, к описанию процессов масштаба, меньшего, чем пространственное разрешение РКМ.

Региональная модель климата высокого разрешения, разработанная в ГГО (Школьник и др., 2000), позволяет существенно детализировать глобальные поля климатических характеристик. В настоящей работе использованы данные РКМ, имеющей пространственное разрешение 50 км. Граничные условия РКМ получают путем пространственно-временной интерполяции пере-

менных глобальной модели атмосферы ГГО (разрешение по горизонтали 250 км, по вертикали 25 слоев неравномерной толщины) с использованием метода вложенных сеток. Область расчетов по РКМ занимает территорию Арктического бассейна, включающую в себя БМ, размером  $7550 \times 7550$  км с числом узлов сеточной области  $151 \times 151$ . Число узлов в бассейне БМ составило  $35 \times 25$ . Используются расчеты для периода 1981—2000 гг.

Помимо данных РКМ, численные эксперименты проведены с использованием результатов расчета климатических характеристик по глобальной модели Института Макса Планка (ЕСНАМ5/MPI-OM), которые интерполировались в узлы сетки  $50 \times 50$  км. Данные ЕСНАМ выбраны из данных ансамбля моделей ГКМ, поскольку они наилучшим образом воспроизводят эволюцию границы ледового покрова в Баренцевом море в настоящее время.

Одномерная нестационарная численная модель верхнего слоя океана построена с учетом диффузионного газопереноса и переноса газа пузырьками при шторме. Газоперенос пузырьками непосредственно соотносится с характеристиками состояния морской поверхности, такими как относительное покрытие ее пеной и продолжительность существования пятен пены. В модели учтено воздействие карбонатной системы морской воды на изменение содержания растворенного  $\text{CO}_2$ , происходящее в условиях штормового усиления ветра. Последовательные по времени значения потоков и содержания газов в воде находятся при задании временного изменения скорости ветра. В уравнения газопереноса для  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  входит внутренний источник, создаваемый пузырьками, заполняющими поверхностный слой океана при сильном ветре. Источник может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от степени насыщения воды газом.

Предполагается, что нижняя граница расчетной области совпадает с нижней границей пограничного слоя, определенной как уровень, на котором кинетическая энергия турбулентности становится меньше заданного порогового значения. Этот уровень расположен ниже заданной глубины верхнего квазигомогенного слоя (ВКС). Параметр шероховатости морской поверхности и верхние

граничные условия для составляющих скорости течений и масштаба турбулентной энергии находились по заданной скорости ветра. Выбор параметра шероховатости морской поверхности при разных скоростях ветра выполнен с учетом особенностей структуры пограничного слоя атмосферы над морем (Орленко, 1979).

На этапе инициализации МГО расчетные профили концентрации газов в воде соответствовали средним сезонным климатическим условиям. Условия усиления ветра воспроизводились в диапазоне значений от 11,5 до 26,5 м/с путем введения соответствующих параметров взаимодействия вода—воздух в граничные условия и источников/стоков в уравнения газопереноса. Продолжительность этапа усиления скорости ветра в режиме реального времени соответствует экспериментальным значениям продолжительности штормов в БМ (Survey report, 2009). Оценки проводились без учета биологических процессов, влияющих на концентрацию растворенного в воде газа.

МГО используется в режиме *off line* в узлах регулярной сетки РКМ с привлечением в качестве входных параметров средних сезонных значений температуры поверхности (ТП) воды, солёности, скорости ветра на уровне 10 м и характерных профилей температуры и солёности, полученных экспериментально для отдельных участков моря или рассчитанных на основе ГКМ. Для условий современного климата пространственные распределения ТП получены по данным реанализа осреднением за период 1981—2000 гг. Пространственное распределение скорости ветра получено осреднением за тот же период выходных данных РКМ. Как уже было сказано, привлекались также расчетные данные ЕСНАМ по ТП, солёности и скорости ветра. Эти данные, рассчитанные на одноградусной пространственной сетке, интерполировались в узлы сетки РКМ и усреднялись за указанный выше период времени. Глубина ВКС задана приближенно.

При реализации МГ на каждом шаге по времени, составлявшем 25 с, вычислялись значения переменных для верхнего слоя БМ толщиной 123 м. Шаг по ординате менялся от 1 см у морской поверхности до 1,5 м у нижней границы слоя. Для расчета интегральных значений потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  за сезон использовалась ап-

проксимация плотности вероятности распределения скорости в виде функции средней климатической скорости ветра за сезон. Найдено, что зависимость плотности вероятности от скорости ветра может быть достаточно точно описана распределением Максвелла (Bortkovskii, 2002), которое и было использовано для оценок интегральных значений потоков.

## **2. Сравнительный анализ данных по климату за период 1981—2000 гг.**

Для того чтобы оценить степень неопределенности, вносимую в расчеты характеристик газообмена различиями в модельных оценках современного климата, необходимо проанализировать эти различия и понять, какие из них имеют наибольшее значение при оценках пространственных распределений потоков газа.

Из рис. 1 видны различия между средними за зимний сезон распределениями температуры поверхности океана и скорости ветра, полученными по данным реанализа, по данным РКМ и интерполированным данным ЕСНАМ. Распределение температуры, полученное по ГКМ (ЕСНАМ), соответствует температуре воды, осредненной по приповерхностному слою толщиной 6 м. За неимением других данных эта температура принималась равной температуре поверхности при инициализации профилей температуры, соответствующих средней климатической скорости ветра, в слое воды БМ толщиной 123 м.

Таким образом, заранее понятно, что различия в распределениях температуры поверхности, полученные по данным ГКМ и РКМ, могут давать некий вклад в расчетные значения потоков  $O_2$  и  $CO_2$ . Из рис. 1 видно, однако, что положение изолиний температуры поверхности, принятой в качестве входных данных в МГО в соответствии с указанными ограничениями на основе ГКМ и РКМ, удовлетворительно согласуется для обеих моделей. ГКМ удовлетворительно воспроизводит особенности температурного поля, связанные с поступлением Атлантических вод в БМ. При этом температурный фон в расчетных распределениях ГКМ приблизительно на 2—2,5 °С завышен по сравнению с данными

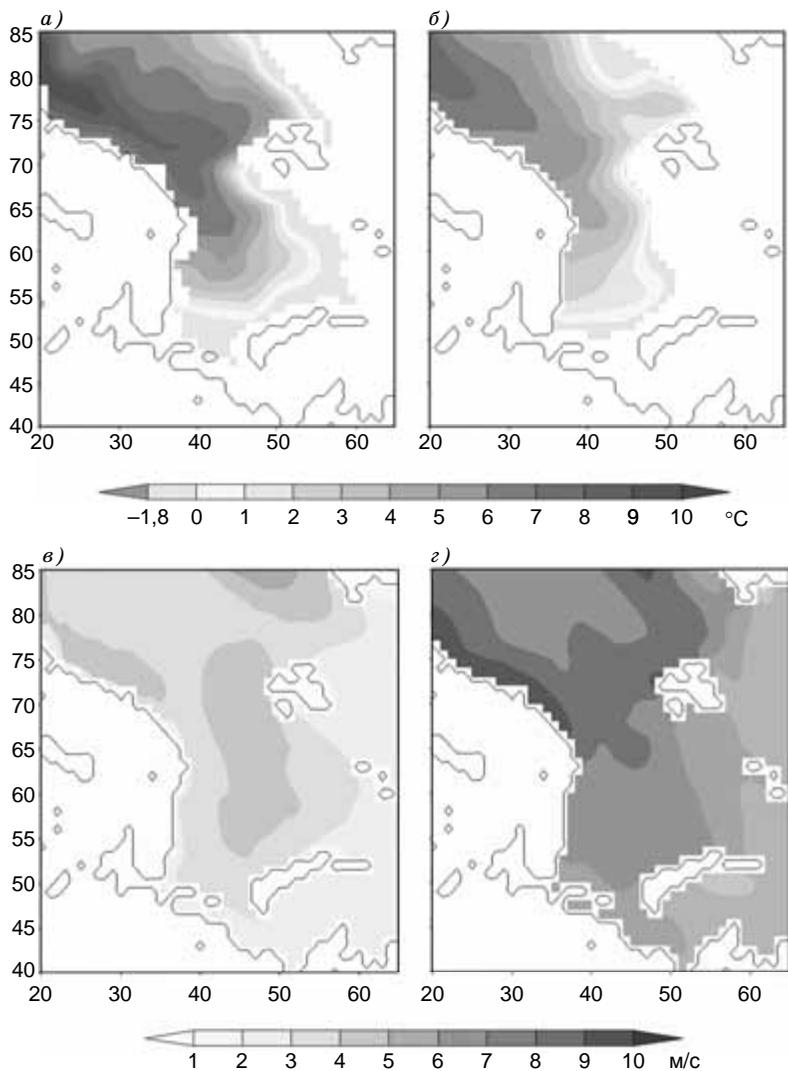


Рис. 1. Климатические модельные данные за период 1981—2000 гг. о температуре ( $^{\circ}\text{C}$ ) поверхности воды (*a*, *б*) и скорости ветра ( $\text{м/с}$ ) на высоте 10 м (*в*, *з*) в зимний сезон.

*a*, *в* — ЕСНАМ; *б*, *з* — РКМ.

реанализа как в зимний (см. рис. 1 *a* и *в*), так и в летний сезон. Особенно заметны высокие значения температуры по данным ГKM в районах распространения Атлантических вод.

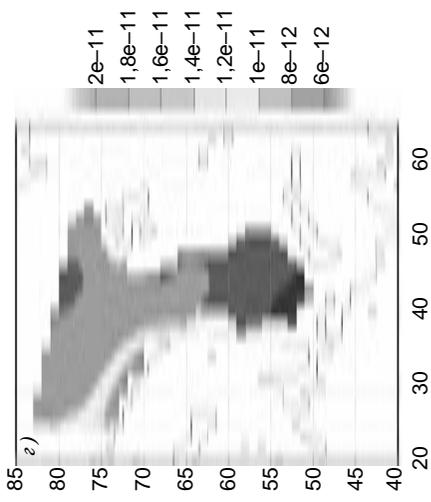
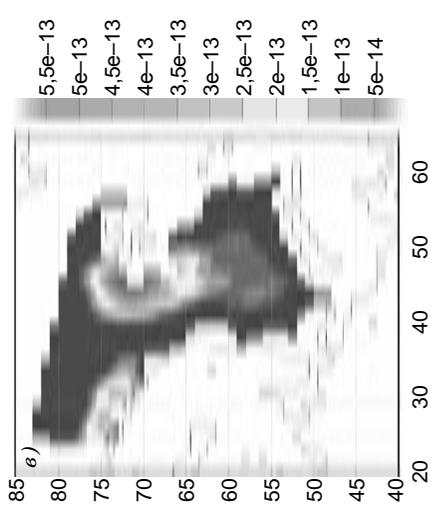
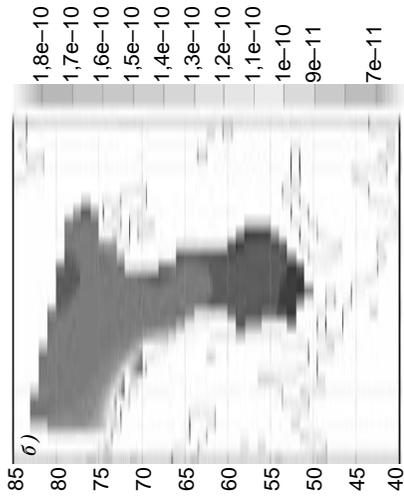
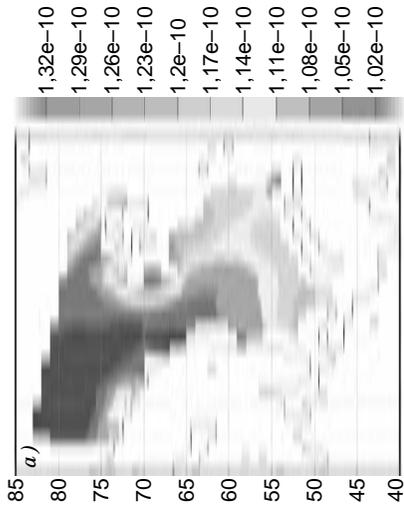
Различия расчетных распределений средней за сезон скорости ветра, полученных по разным моделям, выражены гораздо больше (см. рис. 1 *б* и *г*). Занижение средней за сезон скорости ветра по ГKM отмечается и зимой, и летом, но в летний сезон оно проявляется наиболее заметно. В летнее время, по данным ГKM, средняя за сезон скорость ветра практически не изменяется по акватории и не превосходит 3 м/с. На большей части акватории БМ по данным РКМ летом средняя скорость ветра составляет от 5,5 до 6 м/с.

Отметим, что распределения солёности были приняты одинаковыми для РКМ и ГKM, равно как и распределения температуры на нижней границе расчетной области. Последние соответствовали расчетным результатам ЕСНАМ, которые удовлетворительно воспроизводят данные реанализа относительно солёности.

### **3. Расчетные распределения потоков CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> по акватории БМ**

Рассмотрим, как проявляются особенности распределений температуры поверхности и скорости ветра в расчетных значениях потоков углекислого газа и кислорода. Наибольший интерес представляет анализ соотношений между потоками газа, создаваемыми за счет разных физических процессов.

Пространственные распределения диффузионных и пузырьковых потоков CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> были получены для теплого (июнь—сентябрь) и холодного (декабрь—март) сезонов. В разные сезоны в разных моделях расчетное соотношение между потоками, имеющими разный механизм переноса, оказывается неодинаковым. Так, в зимнее время, по данным РКМ, диффузионный поток CO<sub>2</sub> оказывается преобладающим на всей акватории БМ и почти полностью определяет суммарный сток CO<sub>2</sub>. Это отражается в совпадении распределений диффузионного и суммарного потоков на рис. 2 *г* и *е*. Аналогичный эффект проявляется и в расчетных значениях потоков CO<sub>2</sub>, полученных с использованием данных



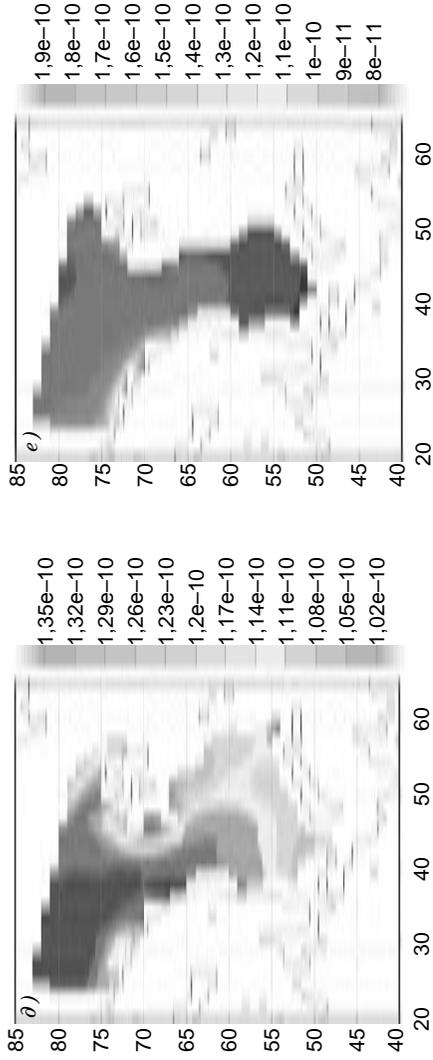


Рис. 2. Пространственное распределение плотности потока  $\text{CO}_2$  ( $\text{г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) по акватории БМ в зимний сезон по данным ЕСНАМ (*a*, *e*, *д*) и РКМ (*б*, *з*, *е*).

*a*, *б* — диффузионные потоки, *в*, *з* — потоки за счет переноса газа пузырьками при шторме, *д*, *е* — суммарный сток  $\text{CO}_2$ .

ЕСНАМ (см. рис. 2 а и в). При расчетах по данным РКМ перенос  $\text{CO}_2$  пузырьками при шторме в зимний сезон приблизительно на порядок меньше, чем диффузионный перенос. При расчетах по данным ЕСНАМ перенос  $\text{CO}_2$  пузырьками оказывается на три порядка меньше, чем диффузионный перенос. Это естественное следствие заниженной скорости ветра, рассчитанной по ГКМ.

В летнее время, как показывает анализ, диффузионные потоки  $\text{CO}_2$ , рассчитанные по климатическим характеристикам РКМ, являются преобладающими, равно как и потоки, рассчитанные по данным ЕСНАМ. При этом перенос  $\text{CO}_2$  пузырьками, полученный по данным РКМ, в летнее время существенно возрастает и в некоторых районах становится сравнимым с диффузионным переносом. Суммарный сток  $\text{CO}_2$  в воды БМ имеет один и тот же порядок для РКМ и ГКМ, но значения потоков, полученные на основе РКМ, приблизительно в 1,3—1,5 раза больше, чем значения потоков, полученных по данным ГКМ (рис. 3).

Сравнение расчетных потоков  $\text{CO}_2$  в разные сезоны показывает, что распределения по акватории суммарного стока этого газа в теплый и в холодный сезон различаются (в холодное время года потоки  $\text{CO}_2$  в среднем на 30—40 % больше, чем в теплое время). Эти различия имеют такой же порядок, как и различие потоков для разных участков акватории.

Распределения потоков кислорода, полученных по климатическим данным разных моделей, обнаруживают те же различия, что и в случае потоков  $\text{CO}_2$ . Однако соотношение диффузионного переноса  $\text{O}_2$  и переноса пузырьками при шторме обратно тому, что было получено для углекислого газа — это видно из рис. 4, на котором показаны распределения потоков  $\text{O}_2$  разного происхождения, полученные с использованием данных региональной модели. Соотношение между диффузионными и пузырьковыми потоками кислорода изменяется по акватории, и пространственное распределение суммарного потока отражает это изменение.

Полученные на основе данных РКМ потоки  $\text{O}_2$ , создаваемые пузырьковым механизмом переноса, как зимой, так и летом

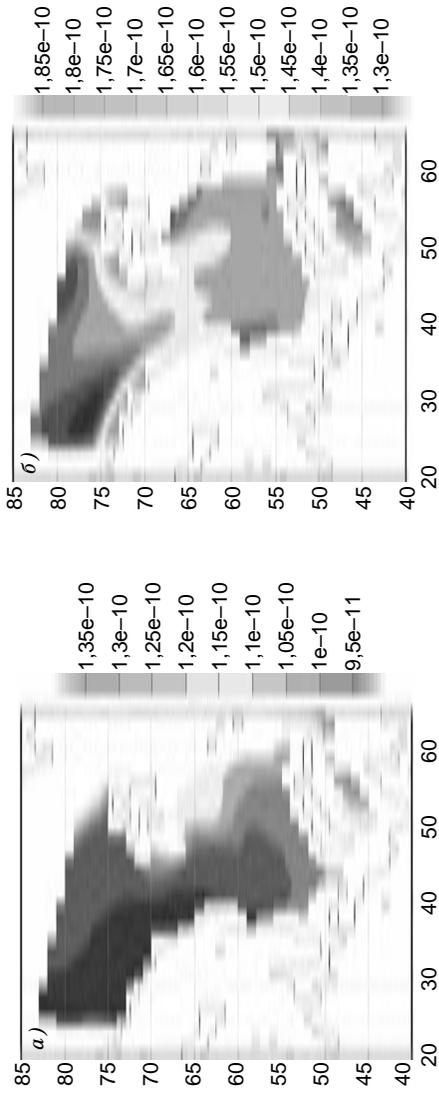
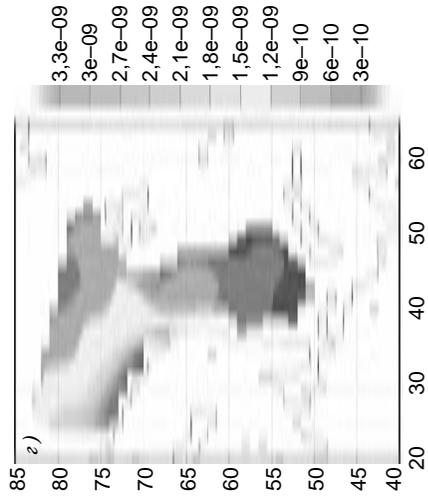
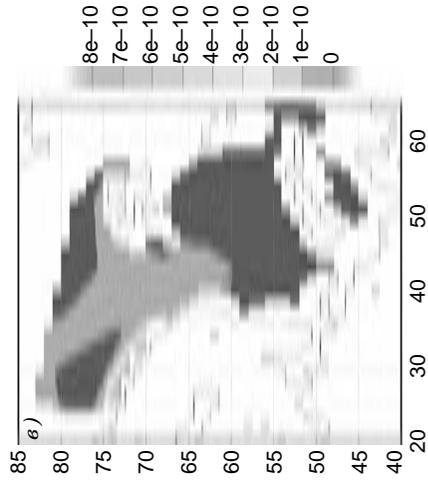
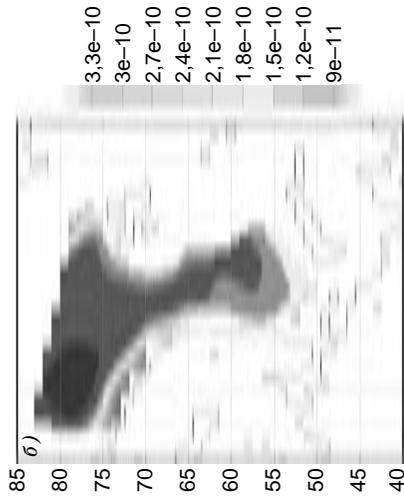
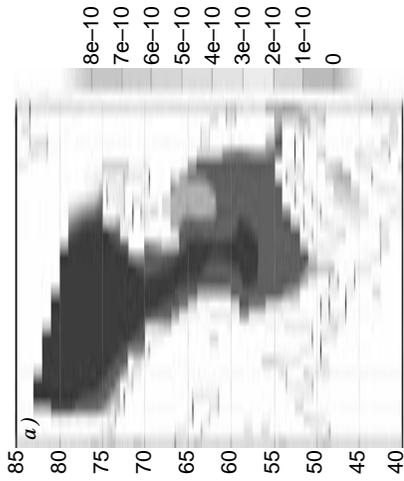


Рис. 3. Распределение плотности суммарных потоков CO<sub>2</sub> (диффузионные + пузырьковые потоки) (г · см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>) по акватории БМ в летний сезон.

*a* — ЕСНАМ, *б* — РКМ.



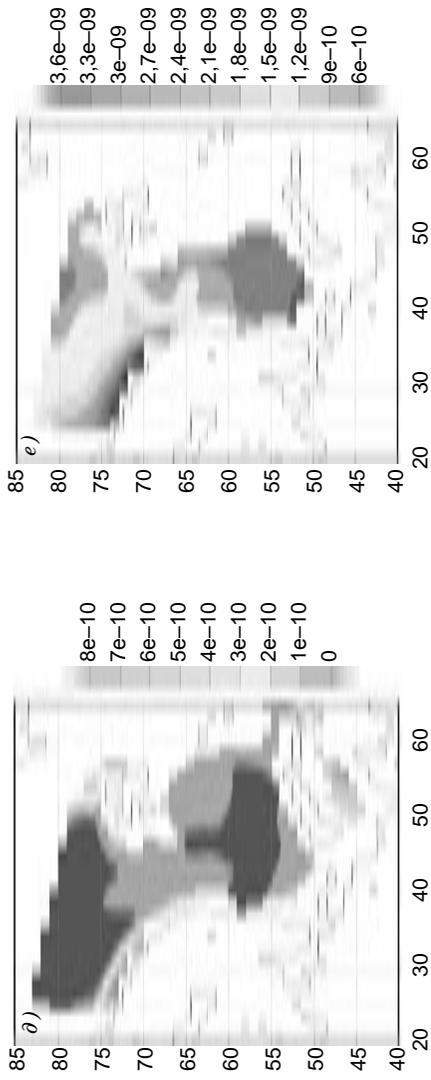


Рис. 4. Распределение плотности потоков кислорода ( $\text{г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), вычисленных на основе данных РГМ, для зимнего (а, б, д) и летнего (б, г, е) сезона.

а, б — диффузионные потоки; в, г — потоки за счет переноса газа пузырями при шторме; д, е — суммарный сток CO<sub>2</sub>.

на большей части акватории сравнимы или превосходят диффузионные потоки этого газа и дают основной вклад в суммарный поток кислорода (см. рис. 4 б, д и в, е). Расчет на основе данных ГКМ показывает, что диффузионные и пузырьковые потоки  $O_2$  сравнимы по величине. При этом на значительной части акватории БМ диффузионные потоки  $O_2$ , полученные с использованием данных ЕСНАМ, имеют отрицательный знак, что и сказывается на распределении суммарных потоков. В летнее время года потоки разного происхождения, полученные по данным ЕСНАМ, имеют одинаковый порядок величины. Суммарные потоки кислорода зимой на порядок больше, чем летом.

Ранее было установлено (Бортковский, 2006), что с учетом газопереноса пузырьками вклад сильного ветра в средний газообмен на большей части Мирового океана оказывается значительным для  $CO_2$  и определяющим для кислорода. С этим результатом согласуются результаты оценок, полученных для БМ.

Отметим, что расчетные распределения суммарных потоков  $CO_2$  и  $O_2$  по акватории складываются под влиянием взаимосвязанных распределений температуры поверхности воды, от которой зависит парциальное давление газа вблизи поверхности, и скорости ветра, определяющей пузырьковый газоперенос. Таким образом, совместный анализ климатических распределений температуры воды, скорости ветра и газовых потоков позволяет понять, что распределение плотности потока  $CO_2$  по акватории менее чувствительно к изменениям температуры поверхности воды, чем к выбору модели, определяющей климатические характеристики. Вместе с тем, если проводить анализ в рамках одной модели (РКМ), то, как было сказано выше, чувствительность расчетных значений потоков кислорода к распределению скорости ветра оказывается весьма заметной, и это приводит к тому, что суммарные значения плотности потока  $O_2$  в центральных районах акватории БМ оказываются в 2—2,5 раза больше, чем в юго-восточных районах.

#### 4. Интегральные годовые потоки CO<sub>2</sub> с акватории БМ

Анализ степени правдоподобия расчетных потоков газа через морскую поверхность трудно выполним в настоящее время в силу как неопределенности измеряемых величин, так и недостаточной точности расчетных методов. Однако именно БМ является наиболее исследованным в этом отношении регионом.

Представляет интерес анализ соответствия расчетных значений потоков имеющимся натурным данным для БМ. Натурными данными принято считать расчетные значения потоков, полученные по измеренным значениям парциального давления газа в воде и в воздухе на основе полуэмпирических расчетных методов или балансовых соотношений. Проведем сравнительный анализ для двуокиси углерода, используя результаты, полученные на основе измеренных значений парциального давления CO<sub>2</sub> с использованием широко распространенного метода Ваннингофа (Wanninkhof et al., 2009; Li-Quing Jiang et al., 2008). Результаты сравнения представлены в табл. 1, в которой приведены средние за сезон и среднегодовые значения плотности потоков и интегральных значений потоков со всей акватории БМ. Следует иметь в виду, что данные наблюдений получены только в отдельные годы и не могут, вообще говоря, использоваться в качестве климатических обобщений. В настоящей работе к зимнему сезону были отнесены осредненные результаты расчета с декабря по март, а к летнему сезону — с июня по сентябрь. Такой выбор сезонов соответствует нормам, обычно принимаемым при анализе сезонных особенностей температурного режима БМ (IASC, 2012).

Модельные значения потоков заметно занижены по сравнению с данными литературных источников, и только в одном случае (данные из работы Kaltin (2002) для арктических вод БМ) наблюдается удовлетворительное согласование потоков, полученных разными способами. Отметим, что результат, полученный в работе Nakaoka et al. (2006), где приведены непрерывные оценки для годового цикла, показывает, что зимний сток CO<sub>2</sub> из атмосферы в воды БМ превосходит сток этого газа в летний сезон, что подтверждается выполненными оценками для акватории БМ.

Таблица 1

Сравнение сезонных и годового стоков CO<sub>2</sub> на акватории БМ

Сезон	Данные экспериментов			Модельные данные			
	Накаока (2006)	Omar et. al. (2007)	Fransson (2001)	Kaltin (2002)		ГКМ	РКМ
				Атлант. воды	Аркт. воды		
	<i>Плотность потока CO<sub>2</sub>, г C · м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup></i>						
Зима	63±22					10	15
Лето	43±17					9	12
Год	46±18	51±8	44±10	29±11	13	9,5	13,5
	<i>Интегральный поток CO<sub>2</sub>, 10<sup>12</sup> г C · год<sup>-1</sup></i>						
Зима						15	24
Лето						13	19
Год	70±27	77±12	67±15	44±16	19,5	14	20

## Заключение

Выполненный в работе анализ подтверждает, что разные механизмы газопереноса через морскую поверхность проявляются по-разному для разных газов. Взаимодействие термических и динамических эффектов определяет специфику распределения по акватории потоков углекислого газа и кислорода. Оценки потоков CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> требуют уточнения, и в первую очередь при более корректном задании входных данных МГО.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Бортковский Р. С., Егоров Б. Н., Катцов В. М., Павлова Т. В. (2007). Чувствительность газообмена к изменениям климата: модельные оценки среднего

газообмена между океаном и атмосферой в условиях современного климата и при его изменениях, ожидаемых в 21 веке // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43, № 3. С. 313—318.

*Орленко Л. П.* (1979). Стрoение планетарного пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеoиздат. 270 с.

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

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

*Borges A. V., Schiettecatte L. S., Abril G., et al.* (2006). Carbon dioxide in European coastal waters // Estuarine Coastal and Shelf Sci. No. 70. P. 375—387.

*Bortkovskii R. S.* (2002). Atmospheric-ocean gas exchange due to bubbles generated by wind wave breaking // Gas Transfer at Water Surfaces, Geoph. Monogr., 127. P. 261—264.

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

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

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

IASC (International Arctic Sciences Committee) (2012). Anticipated changes in physical conditions in the Arctic in Encyclopedia of Earth / Retrieved August, 6, [www.eoearth.org/article/](http://www.eoearth.org/article/).

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

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

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

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

*Nakaoka S., Aoki S., Nakazawa T. et al.* (2006). Variations of oceanic pCO<sub>2</sub> and air-sea CO<sub>2</sub> flux in the Greenland Sea and the Barents Sea // Tellus, 58B. P. 148—161.

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

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

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

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

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

**О НОВОЙ МЕТОДИКЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА АНОМАЛИИ  
УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР**

*Г. В. Менжулин<sup>1</sup>, А. А. Павловский<sup>2</sup>, С. П. Савватеев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Россия  
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9  
E-mail: Menz2007@yandex.ru, S.P.Savva@yandex.ru

<sup>2</sup> Центр междисциплинарных исследований по проблемам  
окружающей среды  
191187 Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 14  
E-mail: pa1@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.08.2012  
Поступила после доработки 17.09.2012

**Введение**

В настоящее время исследовательские направления современной климатологии, относящиеся к проблеме глобального потепления, выходят на первый план в науках о Земле. Происходящие изменения климата затрагивают практически все сферы деятельности общества. Согласно заключениям специалистов и решениям международных органов, особенно большое влияние изменения климата могут оказать на сельское хозяйство и на продуктивность сельскохозяйственных растений (IPCC, 2008; Оценочный доклад..., 2008).

По теме последствий современных изменений климата в отношении сельскохозяйственного производства регулярно проводятся обширные исследования с привлечением большого числа научных коллективов и специалистов. Однако следует отметить, что практически все такие исследования посвящены вопросам изменения средней многолетней продуктивности сельскохозяйственных культур при изменении гидротермических условий ре-

жима и роста концентрации углекислого газа в атмосфере. Как правило, в таких исследованиях используются имитационные математические модели продукционного процесса (Menzhulin, Koval, Badenko, 1995; Budyko, Menzhulin, 1996; Сиротенко, Абашина, Павлова, 2009).

Вопрос об изменении повторяемости опасных для сельского хозяйства аномальных (в первую очередь, засушливых) лет при глобальном потеплении поднимается гораздо реже, несмотря на то что важность изучения этого вопроса подчеркивалась неоднократно. Получение достоверных свидетельств влияния изменений климата на повторяемость засух подтверждается данными о причиненном ими экономическом ущербе. Например, среди самых неблагоприятных погодных явлений, наблюдавшихся, например, на территории США в последние 20—30 лет, засухи занимают второе место после тропических циклонов. Так, потери от засух 1980 и 1988 гг. в США составили десятки миллиардов долларов. Катастрофические засухи 1968—1973 гг. в Сахельском регионе Африки отличались суровостью и охватывали огромные площади с населением 25 млн человек. Эти засухи унесли сотни тысяч человеческих жизней и причинили непоправимый ущерб сельскому хозяйству многих стран. Чрезвычайно сильная засуха 2010 г., охватившая большую территорию европейской зернопроизводящей зоны России, причинила многомиллиардный ущерб сельскому хозяйству страны (Мещерская, Мирвис, Голод, 2011).

Ученые выражают серьезную обеспокоенность по поводу того, что ситуация с повторяемостью и продолжительностью засушливых явлений может еще более обостриться в связи с происходящими изменениями климата (Menzhulin et al., 2005; Савватеев, Менжулин, 2009, 2010). В этой связи является крайне актуальной разработка методики прогнозирования повторяемости экстремальных по урожайности лет при глобальном потеплении.

### **Объекты и методы**

Настоящая работа посвящена описанию методики статистического моделирования аномалий урожайности, базирующейся

на сравнительном анализе ансамбля наиболее статистически достоверных регрессионных зависимостей относительных аномалий урожайности от метеорологических факторов (Менжулин, Павловский, 2009, 2010; Menzhulin, Pavlovsky, 2011). Как известно из классических агроклиматических исследований, к таким факторам относятся, прежде всего, аномальное сочетание количества осадков и температуры воздуха. В данной работе, как и в большинстве классических агроклиматических исследований, при построении регрессионных моделей в качестве метеорологических предикторов использовались ряды максимальной и минимальной температуры приземного воздуха и атмосферных осадков во все месяцы вегетационного периода.

Как и в случае любой эмпирико-статистической разработки, в особенности методического характера, для целей нашего исследования наибольший интерес представляли продолжительные непрерывные ряды данных об урожайности сельскохозяйственных культур и метеорологических показателей для отдельных (желательно, небольших по площади) территориальных единиц исследуемой сельскохозяйственной зоны. К настоящему времени в архивах статистических служб различных стран и международных организаций накоплены продолжительные (начиная с 1960 г.) ряды данных об урожайности большого числа сельскохозяйственных культур.

Важно подчеркнуть, что среди прочих статистических архивов по сельскохозяйственному производству, открытых для свободного доступа, наиболее полную информацию, в максимальной степени соответствующую целям нашего исследования, предоставляют статистические архивы Министерства сельского хозяйства США. Основным преимуществом американских сельскохозяйственных архивов является то, что информация в них представлена в целом по штатам, по сельскохозяйственным округам штатов и даже для самых мелких территориальных единиц США — графств, которые по площади в несколько раз, а зачастую и на порядки меньше, чем, например, российские области или края. Нередко ряды данных представлены за период от начала XX столетия до настоящего времени. Кроме того, эти архивы выгодно отличает наличие в них большого количества сопутствующих данных, что является весьма

удобным для анализа качества рядов, и выбора наиболее адекватных показателей урожайности. По указанным причинам отработка развитой авторами методики агроклиматического моделирования была осуществлена на примере 105 графств американского штата Канзас. В качестве исследуемой сельскохозяйственной культуры выбрана озимая пшеница, по производству которой штат Канзас всегда занимал и занимает в настоящее время лидирующее положение в США.

Производя анализ рядов урожайности сельскохозяйственных культур, нельзя не заметить, что в последние 60 с лишним лет сельское хозяйство развитых и некоторых развивающихся стран характеризуется значительным ростом урожайности основных продовольственных культур, включая интересующую нас пшеницу. В применении к территориальным единицам штата Канзас это демонстрируют примеры динамики урожайности озимой пшеницы и сорго в некоторых его графствах (рис. 1). Урожайность пшеницы в графствах Decatur и Coffey возросла в период 1926—2007 гг. более чем в три раза, урожайность сорго в графствах Neosho и Pawnee в 1943—2007 гг. — в шесть-семь раз. Однако, несмотря на общий рост урожайности, ее межгодовая изменчивость, вызванная вариабельностью погодных условий, по-прежнему остается весьма значительной.

Влияние интенсификации агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур на их урожайность существенно затрудняет исследование эффектов погодно-климатической изменчивости последней. Исходя из того что в большинстве случаев при эмпирико-статистическом анализе приходится иметь дело с данными о хозяйственных урожаях, задача исследования показателей роста и изменчивости урожайности становится комплексной и включает не только агроклиматический, но и экономико-технологический компонент. Другими словами, для построения устойчивых схем агрометеорологического прогноза необходимо получение однородных рядов показателей урожайности. Это очень важный вопрос для исследования влияния погодно-климатических факторов на урожайность, который должен решаться на первом этапе разработок.

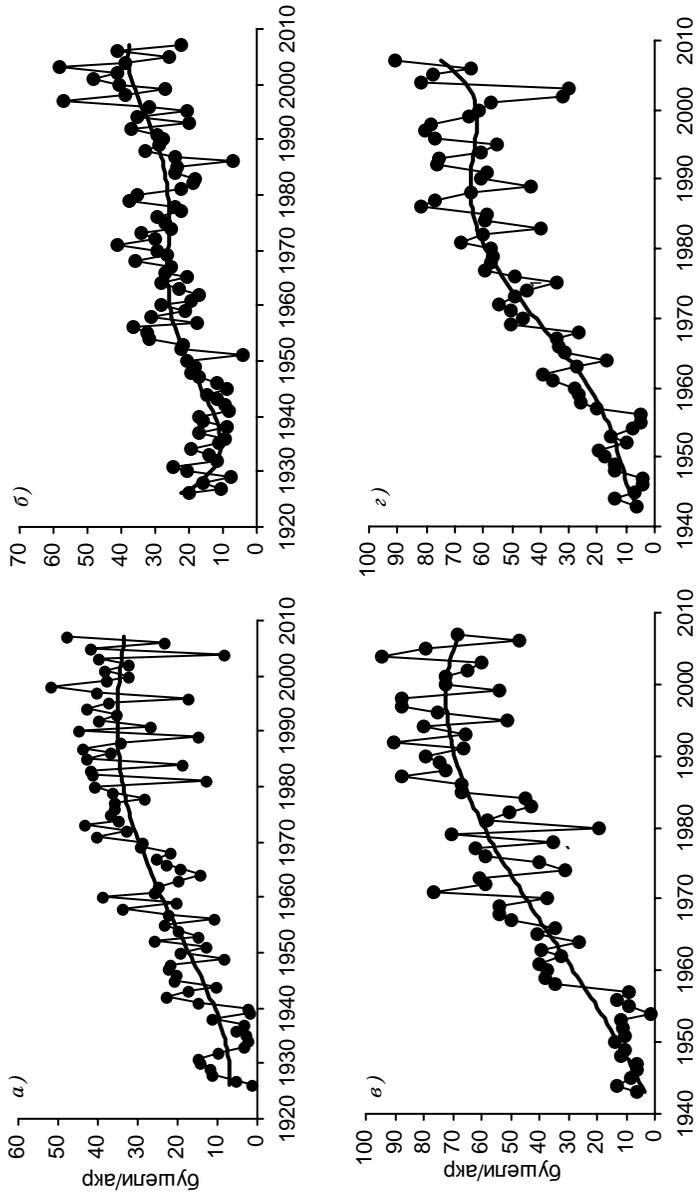


Рис. 1. Динамика урожайности озимой пшеницы и сорго (*1*) и их «межточечные» тренды (*2*) в графствах штата Канзас.

*a* — Decatur (озимая пшеница), *б* — Coffey (озимая пшеница), *в* — Neosho (сорго), *г* — Rawlee (сорго).  
 1 — бушель/акр = 0,67252 ц/га.

Выявление технологических трендов часто затруднено отсутствием конкретной информации о них. Понятно, что технологические факторы стимулируют рост урожайности, но какой фактор и в какой степени — часто остается неясным. При построении индивидуальных регрессионных моделей урожайности для небольших территориальных единиц получить информацию о динамике отдельных технологических факторов для таких территорий, даже используя наиболее полную сельскохозяйственную статистику, какая предоставляется архивом министерства сельского хозяйства США, практически невозможно. Поэтому исследователи, как правило, исходят из использования априорного вида временного тренда урожайности, следуя идее выделения простых трендов, прежде всего линейного.

Существуют различные приемы выделения трендов, но практически все они являются априорными, и каждый из них требует дополнительного обоснования. В силу указанной неоднозначности в конечном итоге использование априорных временных зависимостей для выделения длиннопериодного компонента изменчивости превращает задачу о прогнозировании аномалий урожайности в задачу с некоторой неопределенностью в окончательном результате. Другими словами, нельзя априори утверждать, что какая-то из формул для описания временной зависимости трендовой линии от времени является «единственно правильной». Поэтому в нашем исследовании мы отказались от выделения одного единственного априорного «наилучшего» тренда и реализовали методику, основывающуюся на построении ансамбля трендовых линий. В случае графств штата Канзас такой ансамбль  $Y_k$  включал восемь полиномов (от линейной функции до полинома восьмой степени) и восемь экспоненциальных функций, показателями которых были полиномы до восьмой степени ( $k = 16$ ).

Трендовые линии, проведенные указанным выше образом, позволили построить две группы из шестнадцати рядов показателей относительных аномалий урожайности, которые были использованы в качестве предиктантов регрессионных моделей. Показатели первой группы представляют собой величину  $\eta_k$ , расчет которой проводился по формуле

$$\eta_k(i) = [(y(i) - Y_k(i))/Y_k(i)],$$

где  $y(i)$  — урожайность культуры в год  $i$ ,  $Y_k(i)$  — значение урожайности в этом же году по тренду  $k$  (одному из построенных 16 трендов). Величину  $\eta_k(i)$  уместно назвать относительной (нормированной на трендовое значение) аномалией урожайности культуры в год  $i$ .

В качестве показателей второго типа исследовались относительные потери урожайности. В принципиальном смысле технологическими трендами урожайности сельскохозяйственной культуры можно было бы назвать не ранее рассмотренные «межточечные» тренды (см. рис.1), а некую трендовую линию, составленную из значений урожайности культуры, которая могла бы быть достигнута при максимально благоприятных погодных условиях в каждый год данного временного промежутка. Понятно, что такой тренд должен располагаться выше как «межточечного» тренда, так и «пилообразной» линии реальных урожаев.

Для обоснования методики такого типа необходимо сделать предположение о том, что в принятом для анализа периоде возделывания культуры содержится такой самый благоприятный год. Анализируя построенные ряды относительных отклонений  $\eta_k(i)$  для какого-либо региона, всегда можно найти год, в который относительная урожайность культуры принимала бы самое высокое положительное значение. Это означает, что именно в этот год агрометеорологические условия сложились самым благоприятным образом для получения высокой урожайности.

Для определения вида кривой технологического тренда прием гипотезу об аффинном подобии ранее построенного эмпирического «межточечного» тренда и искомого максимального технологического тренда. В таком случае кривая этого искомого тренда  $Y_{k,M}(i)$ , рассчитанного по «межточечному» тренду  $Y_k(i)$ , будет вычисляться по формуле

$$Y_{k,M}(i) = Y_k(i)(1 + \Delta Y_k^*/Y_k^*) = Y_k(i)(1 + \eta_k^*),$$

где  $\Delta Y_k^*$  — положительное максимальное ненормированное отклонение реальной урожайности от «межточечного» тренда (в год самых

благоприятных метеорологических условий),  $\eta_k^*$  — относительное отклонение реальной урожайности от «межточечного» тренда в этот единственный год наилучших метеорологических условий.

Технологический тренд  $Y_{k,M}(i)$  характеризует ряд потенциальной урожайности при отсутствии «неприятностей» погодного характера. Относительно кривой максимального тренда пилообразная кривая динамики реальной урожайности всегда располагается ниже, т. е. каждый год исследуемого промежутка характеризуется потерями урожайности, равными разности значений максимального тренда и реальной урожайности в этот конкретный год. Примеры трендов максимальной урожайности озимой пшеницы в двух графствах штата Канзас представлены на рис. 2.

Расчет относительных потерь  $\lambda_k$  урожайности от максимального тренда производился по формуле

$$\lambda_k(i) = 100[Y_{k,M}(i) - y(i)]Y_{k,M}(i).$$

Здесь множитель 100 введен для удобства расчета потерь в процентах. Подчеркнем, что расчет относительных потерь урожайности будет проводиться таким образом, что на графиках их значения всегда будут положительными. Это не должно смущать читателя, привыкшего воспринимать потери урожайности как события негативные.

Обратимся к анализу рядов ежемесячных значений температуры приземного воздуха и количества осадков, которые использовались при построении статистических моделей *погода—продуктивность сельскохозяйственной культуры* в качестве предикторов. В качестве основного источника метеорологической информации нами использовались данные из архивов Центра климатической информации США, Мирового центра метеорологической информации «А».

Как уже было отмечено выше, предполагалось, что основными метеорологическими факторами — предикторами, влияющими на урожайность, являются среднемесячная (или среднемесячная минимальная плюс среднемесячная максимальная) температура приземного воздуха и количество осадков во все месяцы вегетацион-

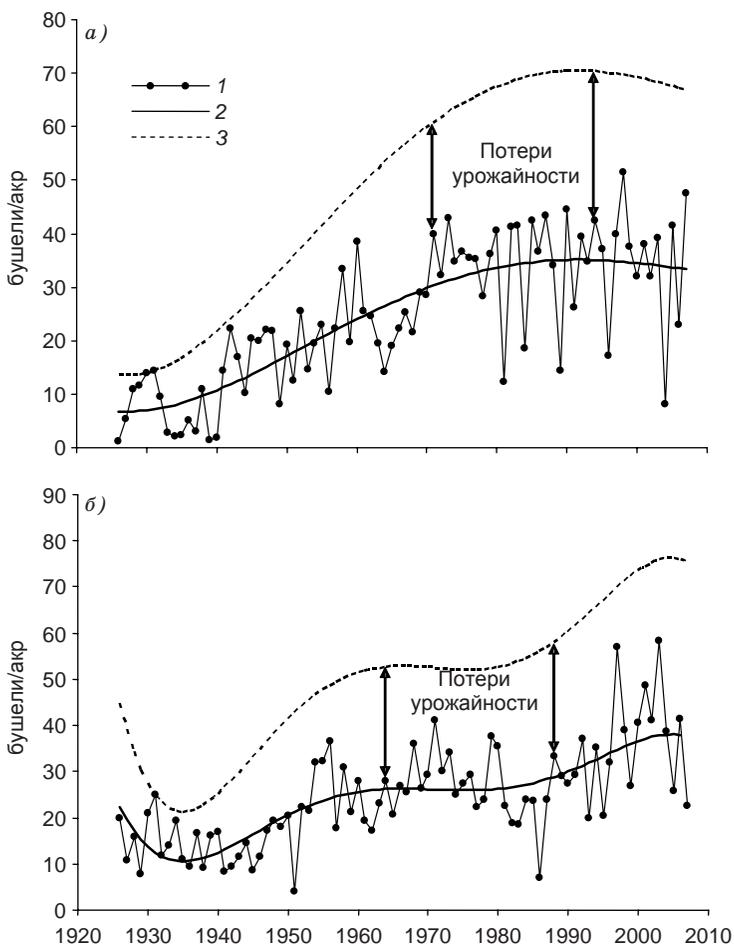


Рис. 2. Примеры «межточечного»  $Y$  и максимального  $Y_M$  трендов урожайности озимой пшеницы в графствах Decatur (а) и Coffey (б) штата Канзас.

1 — данные об урожайности, 2 — «межточечные» тренды ( $Y$ ),  
3 — максимальные тренды ( $Y_M$ ).

ного сезона. Другие метеорологические факторы в наших расчетах не использовались. При подготовке рядов метеорологических предикторов, как и при подготовке рядов предиктантов — показателей урожайности, необходимо было решить вопрос о выделении длиннопериодного компонента их изменчивости. В первую очередь, этого требует логика постановки задачи: предиктанты в моделях представлены безразмерными показателями  $\eta$  или  $\lambda$ , и, следовательно, методически корректным было бы и предикторы представить в виде безразмерных величин. Однако более важное обстоятельство, послужившее в пользу принятия такого решения, состоит в том, что главная цель данной работы — построение статистической модели оценки изменений повторяемости аномалий урожайности при ожидаемых изменениях климата, т. е. отклонений показателей урожайности от их среднего уровня в будущем, или в более общем случае от трендовых значений.

Понятно, что в связи с развивающимся глобальным потеплением понятие средних значений за относительно продолжительный промежуток времени в будущем является условным. Справедливым будет и утверждение, что аналогичная картина не могла не иметь место и в историческом прошлом, и поэтому характеризовать изменения климатических условий за продолжительные временные промежутки формально осредненными по времени значениями метеорологических элементов не всегда уместно. Это относится, прежде всего, к анализу динамики регионального климата. В связи с этим потребовалось «очистить» ряды метеорологических величин от длиннопериодного компонента изменчивости и считать относительные отклонения метеорологических параметров от их трендов показателями влияния аномалий метеорологических условий на аномалии урожайности.

На основании проведенного анализа, как и в случае с предиктантами  $\eta$  или  $\lambda$ , при выявлении наиболее достоверных статистических моделей было решено не ограничиваться «выделением» из рядов метеорологических предикторов трендов какого-то одного определенного вида. Вычисления проводились с использованием ансамбля трендовых линий, и выбор в пользу того или иного тренда проводился на финальном этапе построения моде-

лей — при анализе статистических свойств каждой из них. Другими словами, в данной работе не использовались априорные гипотезы и предположения о «наилучших» трендах многолетней динамики метеорологических факторов, и в массовые расчеты вовлекались ансамбли трендов для всех метеорологических факторов урожайности.

Поскольку при проведении расчетов в набор предикторов включались все возможные комбинации из трех показателей термического режима (среднемесячное, среднемесячное максимальное и среднемесячное минимальное значения температуры) и месячной суммы осадков, каждый из упомянутых предикторов представлялся в пяти вариантах их отклонений от трендов, представляемых в виде полиномов от первой до пятой степени.

Использованный в данной работе способ определения наилучших регрессионных моделей в практике статистического моделирования является методом прямого перебора, при котором анализируются статистические свойства каждой из всех возможных линейных многофакторных регрессий. Алгоритм его реализации конструируется согласно следующему принципу. На первом этапе расчетов для каждого региона строятся все возможные двухфакторные линейные регрессионные уравнения. При расчетах применительно к каждому графству штата Канзас в случае включения в перебор 36 предикторов (минимальная и максимальная температура плюс количество осадков за каждый месяц) число таких двухфакторных регрессий составляет 11 340. Второй этап расчетов — это построение в применении к каждому из 18 предиктантов всех возможных трехфакторных регрессий, число которых составляет 114 240. На следующем этапе проводится расчет всех возможных четырехфакторных линейных регрессий, число которых уже почти миллион. Число пятифакторных линейных регрессионных уравнений при таких расчетах достигает шести миллионов и, наконец, шестифакторных — более 32 млн. В конечном итоге в применении к одному графству штата выбор одной наилучшей многофакторной регрессии проводился из набора, составляющего около 40 млн регрессионных моделей.

Во всех проведенных расчетах в качестве основных показателей качества построенных уравнений регрессии использовался коэффициент множественной корреляции, скорректированный на число степеней свободы ( $R_a$ ), и относительная точность. При этом необходимым условием выбора метеорологических предикторов было удовлетворение условий их статистической значимости. В расчетах мы ориентировались на обеспечение значимости как минимум на уровне 0,95, из чего следует, что, согласно критерию Стьюдента, при построении шестифакторных линейных регрессий при продолжительности рядов в 40 лет величина параметра  $t$  для каждого предиктора должна быть не менее 1,7. Для оценки автокорреляционных связей в рядах остатков использовался критерий Дарбина—Уотсона.

Для реализации описанной схемы определения наилучшей регрессионной модели была составлена специальная компьютерная программа, алгоритм которой позволял проводить расчеты до шестифакторных регрессий включительно. Такое ограничение связано с тем, что, во-первых, компьютерная реализация алгоритма прямого перебора, несмотря на его относительную простоту, занимает большое время, которое существенно возрастает при увеличении числа предикторов, вовлекаемых в расчеты. Во-вторых, как показали результаты расчетов, семифакторные регрессии уже не имеют преимуществ по точности перед шестифакторными, при этом часто проигрывая им по показателям устойчивости включаемых в расчеты предикторов.

Результаты численных экспериментов показали, что построенные регрессионные модели для графств штата Канзас, расположенных в западной его половине, характеризуются более высокими значениями коэффициента множественной корреляции  $R_a$  (0,75—0,90), чем модели для графств восточной половины штата (0,65—0,75). Это связано с тем, что производство озимой пшеницы в западных графствах в большей степени подвержено влиянию метеорологических факторов. Этот вывод подтверждается тем, что, согласно новейшему варианту климатической классификации Кёппена—Гейгера, западная часть штата Канзас

находится в степной зоне (*Bsk*), а восточная — в зоне более влажного континентального климата (*Dfa*), где бóльшая доля дисперсии урожайности может определяться факторами не метеорологического характера.

### Результаты и обсуждение

По срокам окончания посевных работ графства штата Канзас можно разделить на четыре группы: первая группа графств — до 20 октября (20 графств), вторая группа — до 31 октября (41 графство), третья группа — до 5 ноября (15 графств) и четвертая группа — до 15 ноября (29 графств). Линия перемещения посевных работ в штате Канзас проходит приблизительно по диагонали с юго-востока на северо-запад. В силу различий по времени всходов посевов модели урожайности для этих групп графств «запрашивают в свои регрессионные уравнения» различные метеорологические предикторы.

В табл. 1 представлены результаты расчетов повторяемости (%) вовлечения в регрессионные шестифакторные модели метеопредикторов в разные месяцы вегетационного периода для озимой пшеницы, осуществляемого алгоритмом перебора, и средние значения параметра Стьюдента  $t_{cp}$  применительно к четырем группам графств штата Канзас. Отметим, что наиболее часто запрашиваемыми месяцами вегетационного сезона оказались: в первой группе графств — октябрь, февраль, март, апрель, июль; во второй группе — октябрь, январь, март, апрель; в третьей группе — сентябрь, октябрь, март, май, июль; в четвертой группе — сентябрь, октябрь, апрель, май, июнь.

В качестве одного из существенных выводов, полученных при проведении численных экспериментов для штата Канзас с целью выявления наиболее точных и статистически значимых регрессионных моделей зависимости аномалий урожайности озимой пшеницы от метеорологических предикторов, следует отметить, что все без исключения построенные шестифакторные модели

Таблица 1

Повторяемость (%) вовлечения предикторов, отбираемых алгоритмом перебора в шестифакторные модели ( $\theta_{\max}$ ,  $\theta_{\min}$ ,  $\pi$ ), и оценки средних значений параметра Стьюдента  $t_{\text{ср}}$  для них для разных групп графств штата Канзас

Предикторы	Месяц вегетационного периода																																											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII																						
$\theta_{\max}$ $t_{\text{ср}}$ для $\theta_{\max}$ $\theta_{\min}$ $t_{\text{ср}}$ для $\theta_{\min}$ $\pi$ $t_{\text{ср}}$ для $\pi$	<i>Графства первой группы</i>												<i>Графства второй группы</i>																															
	15	35	20	20	15	25	30	15	25	40	29	12	12	15	15	22	54	34	12	15	5	2,8	3,2	2,9	2,5	2,8	3,5	2,5	2,8	2,4	2,9	4,1	2,6	2,5	2,3	3,1	3,0	3,0	2,8	2,6	3,1	2,9		
	0	25	25	10	20	30	10	15	20	15	65	15	20	7	15	37	24	44	27	20	17	41	2,7	2,6	2,4	2,2	2,6	3,1	2,8	3,5	2,8	2,3	4,0	2,5	2,5	2,6	2,5	3,1	3,0	3,2	2,7	2,8	2,8	3,4
	35	95	30	20	15	35	35	15	20	50	32	66	54	24	32	27	22	27	39	39	27	2,7	3,8	3,3	2,7	3,4	2,7	2,6	2,7	3,0	2,5	2,6	3,2	3,6	3,4	2,6	2,8	3,0	3,0	2,8	3,3	2,7	2,3	
	58	47	13	13	27	13	33	27	20	27	27	76	31	10	17	3	21	17	28	17	7	21	2,8	3,1	2,9	2,4	2,3	2,8	2,9	3,0	2,7	2,5	2,9	4,1	3,1	2,7	2,6	3,0	3,3	2,7	3,0	3,2	3,0	2,9
$t_{\text{ср}}$ для $\theta_{\max}$ $\theta_{\min}$ $t_{\text{ср}}$ для $\theta_{\min}$ $\pi$ $t_{\text{ср}}$ для $\pi$	<i>Графства третьей группы</i>												<i>Графства четвертой группы</i>																															
	27	27	7	20	33	13	40	33	40	20	27	7	45	14	14	17	28	17	41	66	24	21	3,1	2,9	2,6	2,3	2,4	3,1	3,0	3,7	2,2	2,6	2,2	2,3	3,4	3,0	2,8	3,0	2,8	3,0	3,2	3,3	2,4	2,6
	27	40	27	0	20	20	20	20	40	33	33	14	24	31	14	31	3	17	38	69	45	14	3,5	3,6	3,2	3,1	2,4	2,6	2,9	3,8	3,5	2,6	2,6	2,5	2,7	3,9	2,7	3,0	3,3	2,2	3,2	3,5	3,3	2,5

*Примечание.*  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$  — относительные отклонения среднемесячного минимального и среднемесячного максимального значения температуры воздуха от тренда,  $\pi$  — относительное отклонение месячной суммы осадков от тренда.

оказались высоко статистически значимыми. Так, анализируя приведенные в таблице значения параметра Стьюдента  $t$  для моделей, построенных применительно ко всем четырем группам графств штата, можно заключить, что все выбранные алгоритмом прямого перебора предикторы характеризуются значениями этого параметра, существенно более высокими, чем это было ему «предписано». Напомним, что нижняя граница значений параметра  $t$  для каждого из предикторов, задаваемая с целью отбраковки неудачных регрессий, равнялась 1,7, что соответствует 95 %-ному уровню значимости. Из таблицы видно, что значения параметра Стьюдента для всех предикторов всех регрессионных моделей существенно выше (не менее 2,2). Это означает, что практически все построенные регрессионные модели обеспечивают статистическую значимость оценок как минимум на уровне 0,975.

### **Заключение**

Представленные примеры показывают, что использование методик статистического моделирования влияния аномалий метеорологических параметров на вариабельность урожайности, реализующих алгоритмы прямого отбора наиболее достоверных многофакторных регрессий из полного их ансамбля, обеспечивают нахождение наиболее точных и статистически обоснованных моделей. Это позволяет отказаться от априорных предпосылок и гипотез относительно искомым статистических связей предиктантов и предикторов, которые не могут не порождать значительные неопределенности в прогностических оценках, получаемых с использованием априори усеченных статистических моделей.

Разработанная методика построения регрессионных моделей относительных аномалий урожайности может быть использована в прогностических расчетах изменений повторяемости аномальных по урожайности лет в будущем, что позволит выявить важнейшие закономерности влияния глобального потепления на сельское хозяйство. В качестве источников прогностической метеорологической информации при этом можно рекомендовать использовать климатические сценарии, упомянутые в четвертом

отчете МГЭИК, а также новые сценарии, рассчитанные по моделям общей циркуляции атмосферы и океана при выполнении международного проекта СМIP5. Так, в частности, описанная в данной работе методика уже использована при оценке изменений повторяемости аномальных по урожайности пшеницы лет до середины текущего столетия в странах и регионах Северной Европы (Менжулин, Павловский, Савватеев, см. наст. сборник).

*Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований, на средства гранта № 11-05-00258 которого было проведено настоящее исследование.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Менжулин Г. В., Павловский А. А. (2009). Эмпирико-статистическое моделирование аномалий урожайности сельскохозяйственных культур, основанное на ансамблевом подходе // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 8, вып. 4. С. 87—99.

Менжулин Г. В., Павловский А. А. (2010). Прогностические оценки аномалий урожайности зерновых культур при изменениях климата / Материалы Всероссийской конференции, посвященной 90-летию академика М. И. Будыко, 10—11 июня 2010 г., СПб НЦ РАН. — СПб: Изд-во ВВМ, с. 46—49.

Менжулин Г. В., Павловский А. А., Савватеев С. П. Влияние ожидаемых изменений климата на повторяемость аномалий урожайности пшеницы в регионах Северной Европы (см. настоящий сборник).

Мещерская А. В., Мирвис В. М., Голод. М. П. (2011). Засуха 2010 года на фоне многолетнего изменения засушливости в основных зерносеющих районах европейской части России // Труды ГГО. Вып. 563. С. 94—121.

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

Савватеев С. П., Менжулин Г. В. (2009). Мировая продовольственная проблема в свете развивающихся процессов глобального потепления / Материалы Международной научной конференции «Роль Вавилонской коллекции генетических ресурсов растений в меняющемся мире», посвященной 115-летию основания Института. 14—17 декабря 2009 г., СПб, Всероссийский институт растениеводства им. Н. И. Вавилова. — СПб: Изд-во ВИР, с. 76—84.

Савватеев С. П., Менжулин Г. В. (2010). Современные изменения климата и мировая продовольственная проблема // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 90-летию академика М. И. Будыко, 10—11 июня 2010 г., СПб НЦ РАН. — СПб: Изд-во ВВМ, с. 71—73.

*Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н.* (2009). Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агросферы: модели, сценарии и результаты / Материалы Международной научной конференции «Роль Вавиловской коллекции генетических ресурсов растений в меняющемся мире», посвященной 115-летию основания института. 14—17 декабря 2009 г., СПб, Всероссийский институт растениеводства им. Н. И. Вавилова. — СПб: Изд-во ВИР, с. 567—573.

*Budyko M. I., Menzhulin G. V.* (1996). Climate change impacts on agriculture and global food production: options for adaptive strategies // *Adapting to climate change: an international perspective* / Eds.: J. B. Smith, N. Bhatti, G. Menzhulin et al. — Springer-Verlag, New York, USA, p. 188—203.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007 — Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (2008). — Cambridge University Press, Cambridge, UK. 956 p.

*Menzhulin G. V., Koval L. A., Badenko A. L.* (1995). Potential effects of global warming and carbon dioxide on wheat production in Commonwealth of Independent States / In: *Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts*. ASA special publication / G. A. Peterson ed. — American Society Agronomy Inc., Madison Wisconsin, USA, No. 59.

*Menzhulin G. V., Savvateyev S. P., Cracknell A. P., Boken V. K.* (2005). Climate change, global warming, and agricultural droughts / In: *Monitoring and predicting agricultural drought*. Ch. 34 / Eds.: V. K. Boken, A. P. Cracknell, R. L. Heathcote. — Oxford University Press, Oxford, New York, USA, p. 429—449.

*Menzhulin G. V., Pavlovsky A. A.* (2011). Global warming and possible changes in the recurrences of grain crops anomalies // In: *Use for satellite and in-situ data to improve sustainability*. Ch. 16 / Eds.: F. Kogan, A. Powell and O. Fedorov. The NATO Science for Peace and Security Programme. — Springer Verlag, p. 145—150.

**ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНЫХ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ  
ПОСЛЕДСТВИЙ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ  
В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕГИОНАХ  
СЕВЕРНОЙ ЕВРОПЫ**

*Г. В. Менжулин<sup>1</sup>, А. А. Павловский<sup>2</sup>, С. П. Савватеев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Россия  
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9  
E-mail: Menz2007@yandex.ru, S.P.Savva@yandex.ru

<sup>2</sup> Центр междисциплинарных исследований  
по проблемам окружающей среды  
191187 Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 14  
E-mail: pa1@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.08.2012  
Поступила после доработки 17.09.2012

**Введение**

В научных кругах сложилось мнение о том, что Северная Европа является регионом земного шара, где проявление ожидаемых изменений климата будет весьма существенным (IPCC, 2008). Ряд оценок на этот счет показывает, что, к примеру, тренд повышения среднегодовой температуры приземного воздуха в Приладожье превышает среднюю глобальную оценку почти в десять раз (Менжулин, 2012). В этой связи представляется крайне интересным оценить возможные последствия ожидаемого потепления в данном регионе для такой важной сферы человеческой деятельности, как сельское хозяйство.

По теме возможного влияния изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных растений регулярно проводятся широкие исследования, результаты которых публикуются в многочисленных работах. Однако большинство из них посвящены вопросам изменения продуктивности сельскохозяйственных культур в среднем многолетнем аспекте. В таких исследованиях

используются имитационные математические модели продукционного процесса, учитывающие влияние на продуктивность изменений гидротермических условий и иногда роста концентрации углекислого газа.

В качестве примера такого исследования, основанного на использовании динамических моделей продукционного процесса системы DSSAT, можно привести один из первых международных проектов «Изменение климата и мировое сельское хозяйство: анализ возможных последствий», спонсированный Национальным научным фондом и Агрономическим обществом США (Menzhulin et al., 1995). Вопрос же об изменении повторяемости аномальных в сельскохозяйственном отношении лет при глобальном потеплении и до настоящего времени поднимается редко.

В данном исследовании для прогнозирования повторяемости аномалий урожайности озимой и яровой пшеницы в зернопроизводящей зоне Северной Европы используется разработанная авторами методика расчета повторяемости аномальных по урожайности лет, основанная на ансамблевом подходе при выборе трендов урожайности и метеорологических факторов ((Менжулин, Павловский, 2010а,б; Menzhulin, Pavlovsky, 2011; Менжулин и др., 2012).

### **Объекты и методы**

В качестве российских районов исследования были выбраны Ленинградская, Новгородская, Псковская и Калининградская области. Странами и регионами, представляющими зернопроизводящую территорию Северной Европы, стали графства Швеции и Дании, регионы Великобритании (Англия, Шотландия, Северная Ирландия, Уэльс), Норвегия, Финляндия и Ирландия, а также страны Балтии.

Важнейшей исходной информацией для любого статистического анализа являются продолжительные и непрерывные ряды данных по урожайности и метеорологическим факторам для отдельных, как можно более мелких по площади, территориальных единиц. С целью получения такой информации обратимся к анализу архивов исторических данных по урожайности пшеницы

для интересующих нас регионов, представленных в сети Интернет. В целом, по отдельным странам мира ряды урожайности сельскохозяйственных культур начиная с 1960 г. приведены в архивах Международной организации по продовольствию и сельскому хозяйству (ФАО) (<http://faostat.fao.org>). Для европейских стран подобная информация представлена в архивах статистической службы Европейского союза EUROSTAT (<http://www.eurostat.ec>). Данные по урожайности для отдельных территориальных единиц некоторых стран можно найти в их национальных сельскохозяйственных статистических архивах. Применительно к Северо-Западному региону России данные по урожайности озимой и яровой пшеницы представлены в целом по областям. Для более мелких территориальных единиц относительно регулярные данные по урожайности пшеницы авторам настоящей работы, к сожалению, отыскать не удалось.

Продолжительность рядов для областей Северо-Запада европейской части территории бывшего СССР составляет 43 года (1945—1987 гг.) (Народное хозяйство СССР..., 1956—1987). Их продолжение после 1991 г. можно найти на сайте Министерства сельского хозяйства России ([www.mcx.ru/navigation/docfeeder/show/164.htm](http://www.mcx.ru/navigation/docfeeder/show/164.htm)).

В Швеции ряды данных по урожайности охватывают период с 1965 г. по настоящее время, хотя рядами необходимой продолжительности для целей построения регрессионных моделей аномалий урожайности пшеницы (20 лет и более) обладают 16 графств для озимой пшеницы и 14 графств для яровой пшеницы. В Дании ряды данных по урожайности озимой и яровой пшеницы представлены для 12 графств. Датские ряды более короткие, чем шведские, их продолжительность составляет 21 год. В странах Балтии (Литве, Латвии и Эстонии) урожайность озимой и яровой пшеницы в целом по странам представлена начиная с конца 1940-х годов; продолжительные ряды урожайности пшеницы для отдельных районов стран Балтии отсутствуют. Для отдельных регионов Латвии имеется информация по урожайности зерновых культур в целом, однако для целей настоящего исследования эти данные ценности не представляют.

Применительно к Норвегии, Финляндии и Ирландии данные по урожайности представлены только по странам в целом и без разделения пшеницы на яровую и озимую. Для Великобритании относительно продолжительный ряд урожайности пшеницы в целом (с 1960 г.) имеется в архиве ФАО. Хотя по восьми регионам Англии короткие ряды урожайности пшеницы можно найти в архивах, однако их ограниченная продолжительность (11 лет) не позволяет использовать их в статистическом анализе. Данные по Шотландии также непродолжительны (короче 20 лет); для Уэльса продолжительность ряда урожайности пшеницы составляет 18 лет, для Северной Ирландии — 26 лет.

В нашем исследовании, как и в большинстве классических агроклиматических разработок, при статистическом моделировании в качестве метеорологических предикторов использовались значения среднемесячной температуры приземного воздуха и сумм атмосферных осадков в месяцы вегетационного сезона. Следует отметить, что использование данных по максимальной и минимальной температуре приземного воздуха дает, как показывают расчеты, более надежные результаты, однако продолжительность рядов характеристик урожайности (предиктантов) часто накладывает ограничение на использование такой информации при построении регрессионных моделей.

В качестве основного источника метеорологической информации авторами использовались архивы Центра климатической информации США ([www.ncdc/noaa/gov/oa/ncdc/html](http://www.ncdc/noaa/gov/oa/ncdc/html)). В применении к территории областей Северо-Запада России и стран Балтии использовались данные, накопленные в архивах ВНИИГМИ—МЦД ([www/meteo.ru](http://www/meteo.ru)). К расчетам привлекались метеорологические данные со станций, расположенных в максимальной близости к географическим центрам зернопроизводства каждого из исследуемых регионов. Основными требованиями к таким данным были их продолжительность и отсутствие пропусков.

При построении статистически устойчивых линейных регрессий важно обеспечить получение однородных рядов показателей как урожайности, так и метеорологических факторов. Как уже неоднократно отмечалось, для этого необходимо изъять из рядов данных о хозяйственной урожайности длиннопериодный компо-

нент ее изменчивости. То же самое необходимо предпринять и по отношению к исходным рядам предикторов. Здесь мы не будем подробно останавливаться на использованных в данной разработке приемах предвычислений рядов предиктантов и предикторов, свободных от длиннопериодных компонентов, что необходимо для обеспечения корректности конструируемых регрессионных моделей. Методика таких расчетов подробно описана в другой работе авторов, представленной в настоящем сборнике (Менжулин, Павловский, Савватеев, 2012).

В итоге после обработки исходной информации для каждого исследуемого региона (для каждого исходного ряда хозяйственной урожайности) был построен ансамбль из 16 рядов относительных отклонений урожайности от технологических трендовых линий. С использованием подобной процедуры для каждого ряда метеорологических параметров рассчитывалось пять рядов нормированных предикторов для каждого месяца вегетационного сезона. Таким образом, для каждого региона производства озимой пшеницы получался набор из 16 значений предиктанта и 60 рядов предикторов. В случае региона производства яровой культуры такой набор в силу того, что вегетационный сезон для нее короче, включал также 16 значений предиктанта, но уже 40 рядов предикторов.

## Результаты и обсуждение

В России по озимой пшенице лучшая модель была получена для Псковской области, для которой скорректированный коэффициент множественной корреляции  $R_{adj} = 0,85$ , по яровой — для Новгородской области ( $R_{adj} = 0,82$ ). Средние значения  $R_{adj}$  для исследованных регионов Северо-Запада России составили: для озимой пшеницы 0,75, для яровой пшеницы 0,71.

Наиболее высокими значениями коэффициента множественной корреляции характеризуются регрессионные модели для графств Дании и Швеции. Средние значения  $R_{adj}$  для моделей по озимой пшенице составляют 0,95 для графств Дании и 0,84 для Швеции, а для моделей по яровой пшенице 0,93 и 0,74 соответственно. Более высокие значения статистических характеристик

моделей для графств Швеции и Дании по сравнению с областями России объясняются, прежде всего, существенными различиями в их размерах. Значения коэффициентов множественной корреляции для регрессионных моделей по озимой пшенице составили: в Латвии 0,72, в Литве 0,80, в Эстонии 0,65; для моделей по яровой пшенице: в Латвии 0,80, в Литве 0,68, в Эстонии 0,76. Для регионов, где исходная информация по урожайности представлена по пшенице в целом, получены следующие результаты. Значения  $R_{adj}$  для таких относительно крупных стран, как Финляндия, Ирландия и Норвегия, составили 0,79; 0,77 и 0,73 соответственно. В административных частях Великобритании, в Северной Ирландии и Уэльсе значения  $R_{adj}$  оказались, естественно, выше и составили 0,95 и 0,92.

Приведенные значения показывают, что регрессионные модели, построенные для более мелких территорий, при условии наличия качественных рядов данных об урожайности и метеорологических факторах характеризуются более высокими значениями статистических параметров, чем модели для крупных административных единиц. Следует подчеркнуть, что практически все полученные модели детально воспроизводят историческую динамику аномалий урожайности.

Как было отмечено ранее, важнейшим и одним из наиболее остро стоящих вопросов современной агроклиматологии является вопрос о возможном влиянии глобального потепления на повторяемость засушливых явлений.

В настоящее время, пожалуй, единственной возможностью количественно оценить ожидаемые последствия изменений климата является использование результатов прогностических расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы и океана. В нашем исследовании в качестве источника будущей метеорологической информации был выбран климатический сценарий ЕСНАМ5 МР1-ОМ, рекомендованный в Четвертом отчете МГЭИК. При построении прогностических оценок повторяемости аномальных по урожайности пшеницы лет авторов интересовали, прежде всего, будущие вариации термического режима приземного воздуха и режима атмосферных осадков. В связи с этим, как и в случае ис-

торической метеорологической информации, снова встает вопрос о выделении длиннопериодного компонента изменчивости из прогностических рядов метеорологических факторов.

Качественный анализ прогностических данных выявил существенные различия в типах тенденций изменений метеорологических элементов в различных регионах. Поэтому при подготовке прогностических рядов предикторов, как и в случае с исторической информацией, было принято решение не ограничиваться использованием какого-то одного априорного тренда, а основываться на анализе результатов, полученных по набору трендов. В качестве такого набора возможных в перспективе трендов метеоэлементов использовались полиномиальные тренды от нулевой (среднее многолетнее значение) до пятой степени. Напомним, что, согласно работе Менжулина, Павловского, Савватеева (2012), для предикторов регрессионных моделей, относительных отклонений метеоэлементов от их трендов, были введены следующие обозначения:  $\theta_k$  — для температурных характеристик и  $\pi_k$  — для атмосферных осадков ( $k$  — номер тренда).

В качестве инструмента для выбора наиболее «обоснованной» трендовой линии изменений метеопараметров в будущем был использован метод интегральных периодограмм. Выбор наилучшей линии, аппроксимирующей временные изменения в будущем, базировался на критерии Колмогорова и рассчитывался с использованием введенного нами эмпирического показателя  $\gamma$ , вычисляемого по формуле

$$\gamma = \min \sum abs(\sigma_i - \sigma_i^*),$$

где  $\sigma_i$  — доля общей дисперсии, суммарно приходящаяся на колебания с частотами выше заданного значения  $i$ ;  $\sigma_i^*$  — то же для «белого шума».

В проведенных расчетах задавались следующие критерии отбора наиболее «обоснованного» тренда для вычисления прогностических значений предикторов (нормированных разностей отклонений от трендовых линий): 1) интегральная периодограмма метеорологического показателя не должна выходить за пределы

99 %-ного доверительного интервала; 2) величина  $\gamma$  при изменении степени полиномиального тренда должна быть минимальной.

В табл. 1 представлена прогностическая динамика повторяемости аномалий урожайности озимой и яровой пшеницы в три десятилетия тридцатилетнего периода 2015—2044 гг. в областях, государствах и графствах зернопроизводящей зоны Северной Европы и в областях Северо-Запада России. В этих таблицах жирным шрифтом выделены крупные отрицательные аномалии урожайности (падение на 15 % и более от трендовых линий), связанные как с засушливыми, так и с другими неблагоприятными для урожайности погодными условиями, согласно использованному модельному климатическому сценарию.

Как показали расчеты (см. табл. 1), согласно выбранному климатическому сценарию в первое десятилетие рассматриваемого периода (2015—2024 гг.) в четырех областях Северо-Запада России условия для производства озимой пшеницы должны сложиться более благоприятно, чем в следующее десятилетие (2025—2034 гг.), когда число неурожайных лет в этих областях может увеличиться на 70 % (от 7 до 12 лет). Увеличение числа лет с «недородами» будет характерно в целом и для стран Балтии (от одного года до пяти лет). То же самое можно сказать и о графствах Дании, где число неблагоприятных лет в первое десятилетие составит 11, во второе — 15. В отличие от упомянутых регионов такой эффект на территории Швеции не проявится: число лет с «недородами» озимой пшеницы во всех ее графствах от первого десятилетия ко второму уменьшится лишь на 15 %. В последнее десятилетие рассматриваемого временного промежутка в областях Северо-Запада России условия для производства озимой пшеницы будут такими же благоприятными, как и в первое. По сравнению с предшествующим десятилетием число лет с «недородами», превышающими 15 %, сократится в два раза. Этот эффект в еще большей степени может проявиться в сельскохозяйственной зоне Дании, а в странах Балтии число неблагоприятных лет уменьшится с пяти до одного. Условия для производства озимой пшеницы в Швеции в последнее десятилетие также будут становиться все более благоприятными, хотя изменение не будет

## Динамика аномалий урожайности озимой пшеницы, рассчитанная

Регион	2015—2024									
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<i>Области России</i>										
<i>Вологодская</i>	-41	-6	22	-7	11	-4	-23	-32	29	3
<i>Псковская</i>	23	6	22	4	19	10	-1	-3	-13	-18
<i>Новгородская</i>	-3	-1	-14	-6	-9	28	-25	-12	-3	-23
<i>Ленинградская</i>	7	13	-17	-12	-7	32	-7	31	-10	3
<i>Страны Балтии</i>										
<i>Латвия</i>	-10	-2	-5	7	-15	5	-11	13	15	-3
<i>Литва</i>	-1	4	5	6	0	-9	-5	10	6	-1
<i>Эстония</i>	-9	-3	2	0	-6	0	2	-5	-2	0
<i>Графства Дании</i>										
<i>Arhus</i>	-23	8	-7	26	5	-7	-5	1	-2	-8
<i>Bornholm</i>	-8	5	-2	6	-5	-5	1	-1	-4	1
<i>Copenhagen</i>	-5	-1	-3	19	-15	-5	24	0	-23	-1
<i>Funen</i>	-21	8	0	11	-2	-1	22	5	-8	-9
<i>N.Jutland</i>	-32	-20	-2	17	8	21	3	-11	9	3
<i>Ribe</i>	-5	0	-5	1	3	7	-10	9	10	-1
<i>Ringkøbing</i>	-5	-4	-4	0	3	5	1	2	6	4
<i>S.Jutland</i>	-4	5	-12	1	1	-1	16	3	-1	6
<i>Storstrøm</i>	-20	8	5	14	-10	-10	43	-5	-23	-13
<i>Vejle</i>	-14	2	2	7	4	5	7	2	2	-2
<i>Viborg</i>	-1	-5	4	4	-6	3	9	-11	-5	4
<i>W.Zealand</i>	11	-21	-33	0	-11	17	-37	-12	3	10
<i>Графства Швеции</i>										
<i>Älvsborg</i>	0	9	-11	-18	-34	-17	12	-3	-21	-11
<i>Blekinge</i>	16	6	5	10	-2	6	-10	-3	3	-1
<i>Gotland</i>	-14	5	-7	34	-4	22	17	11	28	-9
<i>Kristianstad</i>	2	-6	21	-3	-13	11	-9	-1	-3	-11
<i>Malmöhus</i>	-11	-24	2	-20	-15	19	19	-8	-8	-6
<i>Skaraborg</i>	-9	3	-16	4	1	-10	15	13	-12	-7
<i>Kalmar</i>	-1	-19	15	-14	2	9	-16	14	-9	11
<i>Örebro</i>	-18	-12	-10	-39	-13	10	5	32	-26	-5
<i>Östergötland</i>	4	-1	2	-7	-22	8	-16	-1	3	-11
<i>Södermanland</i>	9	6	-17	-2	-8	-4	1	19	3	-6
<i>Stockholm</i>	16	18	-15	-1	-5	-8	-2	13	-1	-1
<i>Uppsala</i>	15	11	0	-10	-10	-4	-17	8	-2	12
<i>Vamland</i>	39	-28	1	-21	3	35	-25	20	10	44
<i>Västmanland</i>	0	9	-14	-20	-14	2	1	19	-19	4

Таблица 1

## по климатическому сценарию ЕСНАМ5 МР1-ОМ

1925—1934										1935—1944									
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
<i>Области России</i>																			
11	31	-32	31	32	-17	29	35	19	-32	-27	-30	3	30	-12	-6	16	25	33	11
-24	-31	0	-17	-20	-2	-6	21	-15	-8	25	-22	7	13	7	-9	14	-10	-1	5
3	2	-18	33	18	-19	-13	-9	10	-7	-6	11	0	-14	-7	-21	23	4	-31	-1
23	7	-4	-3	-17	-6	-15	-16	7	0	17	5	-1	-5	-16	9	7	-3	-8	7
<i>Страны Балтии</i>																			
-1	3	4	-9	14	-7	-16	-23	-12	4	11	19	15	2	-5	3	-7	6	2	-4
-1	-6	-3	0	13	-6	-6	-15	-23	8	5	4	9	6	-4	12	-5	7	-7	-6
-25	5	1	1	5	10	5	-2	-7	12	11	-15	-4	-11	18	20	1	8	5	-3
<i>Графства Дании</i>																			
-7	1	-17	-9	3	29	-18	-13	12	10	-10	-4	4	0	19	-2	0	3	1	-8
3	-2	2	0	0	2	2	4	2	2	10	4	-2	-2	-5	-6	5	9	-6	-7
-25	-16	18	-30	14	28	11	-2	18	5	22	-22	-15	-8	0	10	-5	19	13	22
-18	-15	6	-14	-29	23	7	-5	11	-2	-10	0	2	-9	5	11	-5	17	17	9
-15	-13	14	-6	23	52	17	-6	-14	-3	-10	-32	-15	-3	23	-8	-19	21	4	13
0	2	2	6	-8	-5	-7	-5	3	-4	-6	9	0	3	6	1	-2	-5	3	-3
-10	0	5	-3	-3	9	3	-4	-1	1	0	0	-4	-2	6	2	-10	5	3	-3
-23	-5	20	-14	13	4	2	-21	7	-13	-2	-10	4	1	9	-1	-19	20	3	3
-28	-22	6	-31	-32	45	24	-7	17	-2	-4	-6	-8	-16	7	25	-5	32	33	17
-10	-8	4	-6	-13	12	-4	-3	2	4	-11	1	1	-4	10	4	-7	6	3	2
-11	-5	1	-18	4	22	15	2	-1	1	8	-5	-10	-10	14	7	-13	16	6	7
2	23	9	7	36	-1	19	-1	12	-23	16	-1	-22	-4	36	-6	-12	-11	20	-1
<i>Графства Швеции</i>																			
10	-5	8	-27	27	-32	28	22	-5	1	-12	-3	24	24	2	17	-17	2	-10	6
8	7	-3	-27	-8	-9	9	3	-9	-11	9	13	11	-14	9	1	-8	-2	-1	1
6	13	12	-1	2	-12	11	0	-7	-4	-36	-23	-26	-12	-28	18	21	0	5	-17
1	-5	-5	-2	-16	-9	6	-4	-1	-8	7	7	12	7	27	-4	-9	-1	-1	12
-1	26	33	-29	25	-3	8	2	-8	-7	-14	-2	4	19	22	2	-24	16	1	-32
-4	12	10	-24	8	10	9	-7	6	-16	-13	-6	-8	13	-7	3	-23	15	9	-27
5	19	13	-2	-4	-39	5	1	-3	-1	1	7	21	-14	9	1	-4	11	-5	-6
0	9	17	-32	24	-31	-8	2	-8	-11	-10	6	21	15	33	12	-19	28	-7	22
3	2	14	-9	-11	-11	17	8	1	-3	0	4	-4	15	15	12	-7	11	-8	-4
15	-13	5	-3	-3	-17	0	-10	-4	0	1	-11	-17	-3	16	8	0	4	7	23
15	-20	8	-2	-7	-17	1	-5	-5	-8	0	-9	-16	-6	27	5	-3	6	9	23
18	-17	11	-5	-7	-28	-3	0	-4	-9	7	-3	-10	1	19	5	-4	14	-2	22
-11	-32	-23	6	23	-45	-21	7	-5	-19	32	-2	-4	-19	11	19	-6	22	-22	57
9	-13	17	-19	-3	-11	-4	0	-5	-4	-8	-5	-8	14	31	12	-18	1	2	13

## Динамика аномалий урожайности яровой пшеницы, рассчитанная

Регион	2015—2024									
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<i>Области России</i>										
<i>Вологодская</i>	13	-8	-15	-21	-8	12	-2	29	6	-25
<i>Псковская</i>	22	-15	5	-15	5	33	8	16	3	-1
<i>Новгородская</i>	7	3	33	9	-24	8	-6	-7	-1	-11
<i>Ленинградская</i>	-1	-7	-5	-27	-6	21	-16	3	14	-34
<i>Калининградская</i>	-6	35	4	0	2	-20	5	-35	8	9
<i>Страны Балтии</i>										
<i>Латвия</i>	-32	-12	12	31	27	-29	-18	38	32	4
<i>Литва</i>	7	34	-13	-3	9	-20	-1	25	-5	-4
<i>Эстония</i>	-13	35	12	-15	15	-22	-5	16	7	-1
<i>Графства Дании</i>										
<i>Arhus</i>	-17	-25	-22	17	-15	-14	0	-16	-14	-14
<i>Bornholm</i>	-35	-31	-32	-17	-14	11	8	-14	11	16
<i>Copenhagen</i>	6	-14	14	-2	-7	4	-3	-9	-8	-13
<i>Funen</i>	-34	35	37	-18	39	12	15	38	14	-34
<i>N Jutland</i>	23	-13	31	-18	-23	-6	8	19	11	4
<i>Ribe</i>	-23	14	-4	17	-13	-10	10	21	1	-19
<i>Ringkøbing</i>	11	13	3	-2	15	14	-14	-6	8	4
<i>S Jutland</i>	-13	21	-6	21	-14	11	-14	7	-3	2
<i>Storstrøm</i>	-33	-15	4	16	-31	-14	-11	-14	-13	-3
<i>Vejle</i>	-34	21	17	15	-12	-23	12	27	-9	-26
<i>Viborg</i>	41	-12	16	-18	-13	19	13	-23	-27	27
<i>W Zealand</i>	17	-9	-23	-12	-7	14	-11	-19	-9	7
<i>Графства Швеции</i>										
<i>Älvsborg</i>	-24	14	-3	2	-23	-9	33	9	8	29
<i>Blekinge</i>	-9	19	13	9	-23	4	14	27	28	-25
<i>Kristianstad</i>	-18	26	15	2	-6	-1	3	19	25	-15
<i>Malmöhus</i>	-13	30	-5	-15	27	2	0	20	10	-11
<i>Skaraborg</i>	-13	5	12	22	-4	-16	-2	-16	-6	19
<i>Kalmar</i>	-3	-10	-5	8	-5	15	-3	-13	-14	32
<i>Örebro</i>	-11	-3	-10	9	-12	-4	-7	-6	5	0
<i>Östergötland</i>	-27	11	-13	-1	2	3	-3	8	2	6
<i>Södermanland</i>	-10	20	-2	5	4	-14	-5	10	3	-7
<i>Stockholm</i>	-4	14	-16	-8	-1	-4	-9	-4	-4	-7
<i>Uppsala</i>	0	0	-15	-3	-1	8	-1	-12	1	-5
<i>Västmanland</i>	-2	5	-16	-8	-6	4	-9	-11	-1	-5

Таблица 2

## по климатическому сценарию ЕСНАМ5 МР1-ОМ

1925—1934										1935—1944									
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
<i>Области России</i>																			
10	-5	3	-7	-2	5	-15	-25	-9	27	-1	24	-13	-10	7	-1	4	-6	-24	-6
-35	-2	-6	-26	-16	-25	7	-2	-4	-17	3	-13	-1	12	32	-2	3	26	-13	-20
0	7	5	17	-19	-5	-33	6	9	-29	26	0	22	14	5	-27	-8	-6	-22	-21
31	-18	-27	8	-1	16	-27	-10	9	16	-6	22	5	-22	2	7	24	-4	-7	6
40	10	-33	9	-13	3	-6	13	-5	-3	-7	3	11	0	11	-3	13	-5	22	5
<i>Страны Балтии</i>																			
24	-28	26	-27	2	-32	-3	8	-26	-31	-32	29	16	31	-18	-27	-28	3	-24	21
-26	-15	12	2	-17	0	-11	14	6	-14	-20	15	-5	-9	-3	-19	-17	25	-4	-2
-27	-7	17	-2	-5	-8	-15	2	-6	-8	-4	5	16	5	-13	-4	9	8	-29	1
<i>Графства Дании</i>																			
11	-10	-12	27	11	-17	10	-11	13	27	11	13	7	98	-21	14	7	14	13	-15
-12	12	14	-8	10	11	12	-16	-11	-12	16	14	-7	-8	-9	10	-10	11	9	-7
9	-11	3	0	9	-8	-4	4	-5	11	-11	8	-5	10	-8	3	7	-3	-6	10
-37	-41	31	-15	-43	31	-19	-29	-27	27	-44	33	38	-4	-39	36	34	33	21	31
-5	2	19	16	-14	-17	16	14	2	7	-9	11	-12	11	-6	9	-2	0	-8	9
-14	-18	-4	-2	-21	7	-9	0	19	-2	-14	12	17	6	-14	11	7	16	13	0
-11	11	13	-14	-8	13	-12	0	-9	-11	3	-8	-7	-13	21	-8	-14	-9	-5	14
16	-25	-9	-9	-16	-12	19	17	-14	6	1	23	4	10	-14	-7	-16	20	-12	-8
11	-16	-10	-1	29	-1	-18	11	28	11	8	-8	6	27	4	-7	-21	-19	-22	0
-11	-19	-13	-17	-21	9	-12	12	20	0	-21	6	17	7	-17	11	14	17	9	14
26	27	-20	-21	23	-21	34	19	-26	-14	27	-8	8	-4	9	5	-16	-29	0	15
13	26	12	27	19	-8	7	-13	-14	-10	12	14	-15	3	11	9	-6	9	7	8
<i>Графства Швеции</i>																			
-14	-26	29	9	-15	-7	16	-6	15	-2	-11	13	1	26	-24	8	-3	32	7	-22
-21	-11	19	17	-8	10	4	3	16	11	23	-5	-38	15	9	-22	-24	0	15	11
1	-19	15	1	-7	1	-13	-11	0	5	15	6	-8	24	4	-15	-14	-1	2	3
-9	-8	21	-9	-20	-17	-10	-5	-10	-13	13	1	-4	7	12	-1	-32	11	7	-6
-14	-17	18	11	19	-7	-7	7	-16	1	14	4	6	1	-6	-16	-14	18	17	-10
29	9	-23	-29	1	28	-23	-35	-28	26	4	23	31	28	-6	25	-1	15	-9	-3
10	-11	-6	7	-3	-8	1	15	11	-3	8	8	-3	19	-11	18	5	2	-11	-8
-15	-11	17	2	-15	6	4	4	-2	-2	-10	-5	18	16	-18	6	-10	8	-14	-3
-7	-8	2	-3	-8	3	-11	-5	11	-4	-14	15	4	12	-6	1	-6	12	-4	-2
-5	1	-2	-7	-16	5	-1	-1	23	-13	12	13	0	14	-2	5	-7	5	-1	-11
-10	-5	-5	-3	-7	-3	2	-3	6	-7	25	7	0	12	7	15	-6	0	7	-9
2	-1	-6	-5	-16	1	3	6	17	-11	22	10	0	14	2	17	-3	2	-1	-12

### Динамика аномалий урожайности пшеницы в целом, рассчитанная

Страна	2015—2024									
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<i>Норвегия</i>	-11	3	-9	3	-4	-4	3	19	10	-6
<i>Финляндия</i>	-21	15	34	27	-30	-37	-24	31	21	-34
<i>Уэльс</i>	13	15	-1	-4	-3	-5	-19	8	-7	-7
<i>Ольстер</i>	-9	11	10	-13	-8	-6	-3	-3	1	2
<i>Ирландия</i>	-8	-2	8	6	-11	-9	-8	2	15	7

столь значительным: сокращение суммарного для всех графств Швеции числа лет с потерями урожая, превышающими 15 % по сравнению с предыдущим десятилетием, составит только 12 %.

Прогностические оценки динамики повторяемости неурожайных для яровой пшеницы лет в исследуемом регионе Европы в целом указывают на более значительные изменения числа случаев ее «недородов» по сравнению с озимой культурой (см. табл. 2). Число неблагоприятных лет по урожайности яровых сортов пшеницы суммарно по областям Северо-Запада России, странам Балтии и графствам Дании почти в два раза выше по сравнению с озимыми за весь период 2025—2044 гг. Исключение составляет зернопроизводящая территория Швеции, где возможен противоположный эффект.

И наконец, обращаясь к расчетам по зернопроизводящим зонам Норвегии, Финляндии, Уэльса, Ольстера и Ирландии в целом, проведенным применительно к урожайности пшеницы суммарно (без разделения на озимую и яровую), отметим следующее (табл. 3). В Норвегии, Уэльсе и Ольстере при ожидаемых изменениях климата может наблюдаться тенденция к увеличению повторяемости неблагоприятных лет к концу первой половины настоящего столетия; в Финляндии же и Ирландии такие изменения не должны быть значительными.

### Заключение

По мнению авторов, полученные оценки влияния глобального потепления, приводящего к изменению гидротермических усло-

## по климатическому сценарию ЕСНАМ5 MRI-OM

1925—1934											1935—1944										
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44		
8	-11	-2	4	-17	-11	-2	12	8	-7	-16	12	12	1	-28	-8	7	10	3	-1		
34	-2	-15	13	17	13	0	-21	22	35	-11	23	-20	32	-27	-35	21	-5	15	-9		
20	-14	19	5	20	-5	-11	6	8	-5	2	-11	-22	-4	-32	9	10	-10	19	17		
13	-12	2	-2	0	-1	8	11	-4	16	-9	9	1	0	-16	6	1	4	-17	-6		
-19	21	-1	-1	6	4	-8	-9	-8	2	5	1	2	5	29	4	1	-1	12	-6		

вий в рассмотренных регионах Северной Европы, следует рассматривать как один из примеров оценки влияния на зернопроизводство ожидаемых изменений климата. Понятно, что полученные в данном исследовании оценки изменения повторяемости экстремальных в сельскохозяйственном отношении лет отражают, в первую очередь, особенности использованного климатического сценария. Несмотря на то что сценарий ЕСНАМ5 MRI-OM является одним из наиболее обоснованных модельных сценариев ожидаемых изменений глобального климата, оценки, рассчитанные с использованием других сценариев, разработанных в последние годы в различных исследовательских коллективах, должны способствовать обоснованию более полных выводов об агроклиматических последствиях глобального потепления (Менжулин, Шамшурина, 2010).

По результатам, полученным при выполнении данной работы, можно заключить, что разработанная методика построения статистических моделей повторяемости аномальных для сельского хозяйства лет, основанная на ансамблевом подходе при выборе трендов показателей урожайности и метеорологических факторов, дает возможность выявить важные закономерности влияния глобального потепления на сельскохозяйственное производство.

*Данное исследование выполнено при спонсорской поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 11-05-00258.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Менжулин Г. В. (2012). Изменения гидротермического режима на водосборе Ладожского озера в последние десятилетия / Материалы Ежегодной научной конференции ученого совета факультета географии и геоэкологии СПбГУ (в печати).

Менжулин Г. В., Павловский А. А. (2010а). Прогностические оценки аномалий урожайности зерновых культур при изменениях климата / Материалы Всероссийской конференции, посвященной 90-летию академика М. И. Будыко, 10—11 июня 2010 г., СПб, НЦ РАН. — СПб: Изд-во ВВМ, с. 46—49.

Менжулин Г. В., Павловский А. А. (2010б). Прогностические оценки изменений продуктивности и межгодовой изменчивости урожаев сельскохозяйственных культур при глобальном потеплении / Материалы Международной научной конференции «Роль Вавиловской коллекции генетических ресурсов растений в меняющемся мире», посвященной 115-летию основания института. СПб, Всероссийский институт растениеводства им. Н. И. Вавилова, 14—17 декабря 2009 г. — СПб: Изд-во ВИР, с. 67—75.

Менжулин Г. В., Павловский А. А., Савватеев С. П. (2012). О новой методике статистического моделирования влияния гидрометеорологических факторов на аномалии урожайности сельскохозяйственных культур. — См. настоящий сборник.

Менжулин Г. А., Шамишурина Н. В. (2010). Об адекватности сценариев изменений климата. Воспроизведение изменений климата XX столетия современными климатическими моделями / Материалы Всероссийской конференции, посвященной 90-летию академика М. И. Будыко, 10—11 июня 2010 г., СПб НЦ РАН. — СПб: Изд-во ВВМ, с. 52—54.

Народное хозяйство СССР. Статистические ежегодники ЦСУ при СМ СССР (1956—1989). — М.: Госстатиздат ЦСУ, Статистика.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2008). *Climate Change 2007 — Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. — Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Menzhulin G. V., Koval L. A., Badenko A. L. (1995). Potential effects of global warming and carbon dioxide on wheat production in Commonwealth of Independent States / In: *Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts*. ASA special publication / G. A. Peterson ed. — American Society Agronomy Inc., Madison Wisconsin, USA, No. 59.

Menzhulin G. V., Pavlovsky A. A. (2011). Global warming and possible changes in the recurrences of grain crops anomalies / In: *Use for satellite and in situ data to improve sustainability*, ch. 16 / F. Kogan, A. Powell and O. Fedorov eds. The NATO Science for Peace and Security Programme. — Springer Verlag, p. 145—150.

<http://faostat.fao.org> Интернет-сайт Всемирной организации по сельскому хозяйству и продовольствию (ФАО).

<http://www.eurostat.ec> Интернет-сайт статистической службы Европейского Союза.

[www.meteo.ru](http://www.meteo.ru) Интернет-сайт Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации.

[www.mcx.ru/navigation/docfeeder/show/164.htm](http://www.mcx.ru/navigation/docfeeder/show/164.htm) Интернет-сайт Министерства сельского хозяйства РФ.

[www.ncdc/noaa/gov/oa/ncdc/html](http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc/html) Интернет-сайт Национального центра климатической информации США.

**СТАТИСТИКА ДНЕВНЫХ МАКСИМУМОВ ТЕМПЕРАТУРЫ  
В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД И ВОЗМОЖНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

*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 5.09.2012

Основной целью работы является определение числа летних дней с высокой максимальной за день температурой воздуха в настоящее время и прогноз этой величины в соответствии с происходящими климатическими изменениями. Актуальность этой задачи определяется тем, что по мере распространения как промышленной, так и бытовой техники кондиционирования будет возрастать электропотребление в летний период. Если при этом общий рост потребления электроэнергии будет составлять величину порядка нескольких процентов, то пиковое потребление может, как будет показано ниже, достигать 40 % среднечасового. Результатом станут аварии в системе электроснабжения и веерные отключения электричества в тех регионах, где электрические сети работают с нагрузкой, близкой к предельной. К таким регионам относится, в частности, Московский регион. Этот регион выбран в качестве модели для климатических расчетов и экономических оценок также в силу того, что Мосэнерго является сравнительно «прозрачной» компанией, предоставляющей конкретную экономическую информацию.

**Статистические особенности дневных максимумов  
температуры воздуха**

Оценим параметры функции распределения дневных максимумов температуры в зависимости от средней температуры лета.

В качестве приближения функции распределения можно использовать нормальный закон.

Среднее значение дневных максимумов температуры воздуха отличается от ее среднего значения за лето примерно на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1). При этом среднеквадратичное отклонение зависит от средней температуры за лето по квадратичному закону (рис. 2).

Такое увеличение среднеквадратичного отклонения объясняет феномен аномально жаркого лета 2010 г., вероятность которого в прошлом была крайне низка.

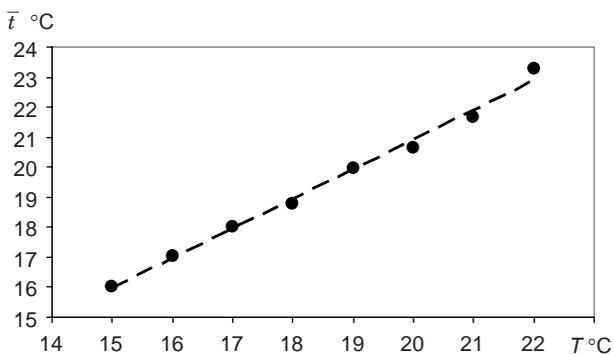


Рис. 1. Зависимость среднего значения дневных максимумов температуры воздуха ( $\bar{t}$ ) от ее среднего значения за лето ( $T$ ).

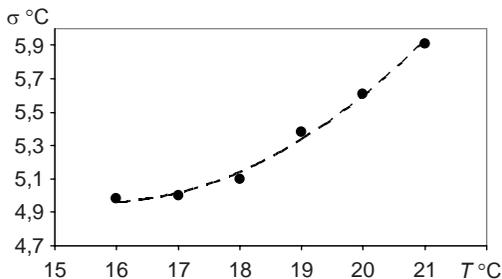


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного отклонения дневных максимумов температуры воздуха ( $\sigma$ ) от ее среднего значения за лето ( $T$ ).

Таким образом, будем полагать функцию распределения дневных максимумов температуры равной

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(T)}} \exp -\frac{t-(T+1)}{2\sigma^2(T)},$$

где  $T$  — средняя температура лета,  $\sigma(T) = 0,034T^2 - 1,08T + 13,4$ .

Межгодовое изменение средней температуры воздуха за лето представлено на рис. 3.

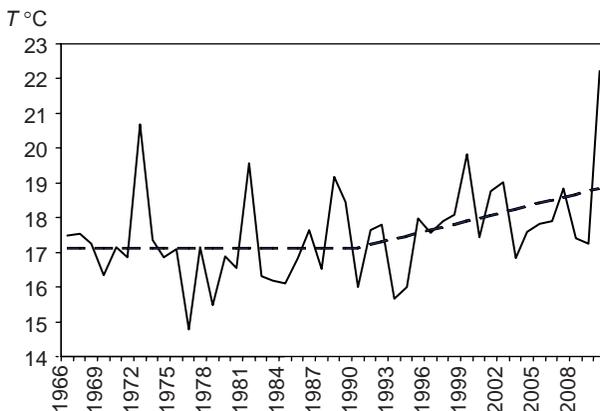


Рис. 3. Межгодовое изменение средней температуры воздуха за лето ( $T$ ).

Штриховой кривой показан тренд.

В качестве линии тренда была выбрана ломаная линия, состоящая из горизонтальной прямой  $T = 17,1$  °C для периода 1966—1990 гг. и прямой  $T = 17,1 + 0,085(n - 1990)$ , где  $n$  — год, для периода 1991—2010 гг. При этом среднеквадратичное отклонение средней температуры лета от ломаной составляет  $\sigma_0 = 1,2$ .

Обозначив через  $T_0$  трендовое значение средней температуры лета, можно положить функцию распределения средней температуры лета равной

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \exp\left(-\frac{T-T_0}{2\sigma_0^2}\right).$$

В итоге математическое ожидание числа дней, в течение которых максимальное значение температуры воздуха находится в интервале от  $t_1$  до  $t_2$ , будет равно

$$N \int_{t_1}^{t_2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \exp\left(-\frac{T-T_0}{2\sigma_0^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(T)}} \exp\left(-\frac{t-(T+1)}{2\sigma^2(T)}\right) dT dt,$$

где  $N = 92$  — число дней в летние месяцы.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Математическое ожидание числа дней с максимальной температурой воздуха ( $t$ ) в зависимости от трендовой средней температуры лета ( $T_0$ )**

$T_0$ °C	$t$ °C									
	18—20	20—22	22—24	24—26	26—28	28—30	30—32	32—34	34—36	36—38
17,0	14	12	9	6	3	2	1	0	0	0
17,5	14	12	9	6	4	2	1	0	0	0
18,0	14	13	10	7	4	2	1	0	0	0
18,5	14	13	11	8	5	3	1	1	0	0
19,0	13	13	11	9	6	3	2	1	0	0
19,5	13	13	12	9	6	4	2	1	1	0
20,0	12	13	12	10	7	5	3	2	1	0
20,5	12	12	12	10	8	5	3	2	1	1
21,0	11	12	12	10	8	6	4	2	1	1

### Экономические оценки

Перейдем теперь к некоторым экономическим оценкам последствий повышения температуры воздуха. Сразу отметим, что нижеприведенные экономические оценки являются достаточно

грубыми и не учитывают целый ряд факторов, информация о которых просто отсутствует.

По данным официального сайта Мосэнерго, производство теплотенергии составляет примерно  $68 \cdot 10^6$  Гкал (или  $2,9 \cdot 10^{17}$  Дж). При этом реальные тепловые потери составляют в среднем по стране от 20 до 50 % (Кара-Мурза, Телегин, 2003). Полагая для Москвы этот показатель равным 25 %, получаем, что до потребителя доходит примерно  $2,2 \cdot 10^{17}$  Дж. Согласно данным Мосэнерго, это соответствует 43 % потребности Московского региона в тепловой энергии. Таким образом, общая потребность в тепловой энергии составляет  $5,1 \cdot 10^{17}$  Дж. Эта энергия идет на покрытие разности между комфортной температурой в помещении, принимаемой равной 18 °С, и температурой окружающего воздуха в отопительный период. При этом необходимо отметить, что при температуре воздуха ниже  $-15$  °С в Москве практически узаконена верхняя срезка температурного графика, когда при подающем трубопроводе поддерживается постоянная температура теплоносителя на уровне 120 °С (Ливчак, 2010). В силу этого покрываемый дефицит тепла надо считать до этой границы. Расчет, выполненный на основе метеоданных, показывает, что он составляет  $5,5 \cdot 10^{12}$  Дж/(°С · ч).

Оценим теперь электропотребление региона. Мосэнерго производит  $65 \cdot 10^9$  кВт · ч электроэнергии ( $2,3 \cdot 10^{17}$  Дж), что покрывает 60 % потребностей региона, откуда следует, что среднегодовое потребление составляет  $4,3 \cdot 10^{13}$  Дж/ч.

Допустим, что регион полностью обеспечен техникой для кондиционирования воздуха. Будем полагать, что «количество холода», которое необходимо для «нейтрализации» избыточного тепла, составляет  $5,5 \cdot 10^{12}$  Дж/(°С · ч), т. е. совпадает с оценкой дефицита тепла, что вполне разумно, поскольку потоки тепла из помещения с некоторой температурой  $T_1$  в атмосферу с температурой  $T_2$  и, наоборот, из атмосферы с температурой  $T_1$  в помещение с температурой  $T_2$  в первом приближении равны. Для «производства» необходимого «количества холода» требуется

$1,1 \cdot 10^{12}$  Дж/(°С · ч) электроэнергии (цифра вполне достижимая для современных установок кондиционирования воздуха). Используя отношение (в процентах) этой величины к величине среднегодового потребления, получаем значение 2,6 %/°С. Это означает, что при полном обеспечении жителей региона кондиционерами повышение наружной температуры свыше 18 °С на 1 °С приведет к увеличению потребления электроэнергии на 2,6 %.

Согласно работе Павликова и др. (2003), в настоящее время нормальными считаются колебания нагрузки вследствие изменения погодных условий до 700—1000 МВт (около 10 %). При более значительных колебаниях возможны веерные отключения электричества и полный комплекс связанных с этим проблем. Так, при повышении температуры до 32—34 °С потребление электроэнергии может возрасти на 36—41 %! (В настоящее время эта величина составляет примерно 5—7 % (BusinesStat, 2009).) При обеспечении населения, офисных центров, магазинов и т. д. техникой кондиционирования воздуха на 40 %, что должно произойти в ближайшие десять лет (в Москве), и ожидаемом повышении средней температуры воздуха в летний период практически гарантированы ежегодные проблемы с энергоснабжением (см. табл. 1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мосэнерго: <http://www.mosenergo.ru>

*Кара-Мурза С., Телегин С.* (2003). Царь-холод, или Почему вымерзает Россия. — М.: Алгоритм.

*Ливчак В. И.* (2010). Энергосбережение в системах централизованного теплоснабжения на новом этапе развития // Энергосбережение. № 2.

*Павликов В. С., Владимиров А. И., Фефелова Г. И., Макоклюев Б. И.* (2003). Обеспечение надежности электроснабжения Московского региона. — М.

BusinesStat (2009). Спрос на кондиционеры в России увеличился: [http://businesstat.ru/russia/surveys/durable\\_goods/home\\_appliances/air\\_conditioners](http://businesstat.ru/russia/surveys/durable_goods/home_appliances/air_conditioners)

## **R/S-СТАТИСТИКА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

*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 5.09.2012

Целью настоящей работы является попытка введения новой климатической характеристики, названной автором временем персистентности, которая вычисляется на базе анализа изменений атмосферного давления. Эта характеристика определяет степень изменчивости погодных условий и связана с процессами циклонической активности, играющими важнейшую роль в формировании климата того или иного региона. Не претендуя на полноту расчетов по всем имеющимся метеорологическим данным, автор попытается выявить некоторые количественные характеристики, определяющие степень изменчивости погодных условий, и дать им качественное толкование.

В основе метода лежит предложенная Херстом (Hurst, 1951) R/S-статистика. Будучи по профессии гидрологом, Херст изучал разливы Нила по данным с 622 до 1429 г. Изучая взаимное влияние размаха наводнений Нила в разные годы, он вывел некий показатель, позже названный показателем Херста. В дальнейшем методология Херста получила оценку в трудах Мандельброта (Mandelbrot, 1982) и после публикации работы Петерса (Peters, 1994) стала широко использоваться в анализе финансовых рынков. Ниже будет изложена некоторая модификация метода, применимая к нашим задачам.

Пусть имеется отрезок временного ряда  $u_k$ ,  $k = 0, \dots, n$ . Возьмем из данного отрезка последовательность  $h_k = u_k - u_{k-1}$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Определим среднее этих элементов  $e = (u_n - u_0)/n$ . Последовательность накопленных отклонений  $X_k$  определяется как

$X_k = u_k - u_0 - ke$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Диапазон определяется как  $R = \max_{1 \leq k \leq n} X_k - \min_{1 \leq k \leq n} X_k$ .

Выборочное стандартное отклонение  $S$  определяется из формулы

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (h_k - e)^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n h_k^2 - e^2.$$

Если теперь взять последовательность таких отрезков и произвести для каждого из них подобные вычисления, то мы сможем определить среднее значение  $(R/S)_n$  как  $(R/S)_n = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \frac{R_a}{S_a}$ , где индекс  $a$  маркирует последовательные отрезки, число которых равно  $A$ .

Теперь построим график зависимости  $\ln(R/S)_n$  от  $\ln n$ . Наклон этого графика определяет показатель Херста  $H$ .

$H \in [0, 5; 1]$  характеризует *персистентный* временной ряд, который определяется долговременными эффектами памяти, когда имеется существенная зависимость от начальных условий, т. е. если ряд имел некоторую трендовую тенденцию, то, скорее всего, он будет сохранять эту тенденцию некоторое время.  $H \in [0; 0, 5]$  означает *антиперсистентность*. Системы такого типа часто называют системами возврата к среднему, т. е. если был подъем, то, скорее всего, начнется спад, и, наоборот.  $H = 0, 5$  соответствует ситуации случайных блужданий.

Персистентный временной ряд отвечает фрактальному поведению переменной (Mandelbrot, 1982). Введем некоторую величину  $n_0$ , измеряемую в числе суток и соответствующую переходу зависимости производной от  $\ln(R/S)_n$  по  $\ln n$  через значение, равное 0,5. Величину  $n_0$  предлагается назвать временем персистентности. На временных отрезках, меньших времени персистентности, атмосферное давление «помнит» свою историю, на больших временах оно про нее «забывает» и меняется по принципу возврата к среднему.

Отметим, что показатель Херста связан с фрактальной размерностью  $D$  по формуле  $D = 2 - H$ . При этом  $D = 1$  отвечает детерминированному процессу,  $D = 1,5$  — случайному.

Далее воспользуемся временными рядами данных о среднесуточном атмосферном давлении.

На рис. 1 отображена зависимость  $\ln(R/S)_n$  от  $\ln n$  для Москвы за 2006—2010 гг. Данная зависимость является достаточно типичной.

Если зависимости такого типа интерполировать параболой и определить, где производная от параболической кривой равна 0,5, то можно получить искомое время персистентности.

В качестве первого примера приведем изменение времени персистенции в течении года для географически близких пунктов (рис. 2 *a*).

Из рисунка видно, что географически близкие пункты имеют практически одинаковое время персистентности, чего, впрочем, и следовало ожидать. Несколько отличается кривая для Костромы, расположенной на сравнительно большем расстоянии от Москвы. Ярко выражены пики в зимний и летний периоды. Малое время персистентности в весенний и осенний периоды предполагают существенную изменчивость погоды.

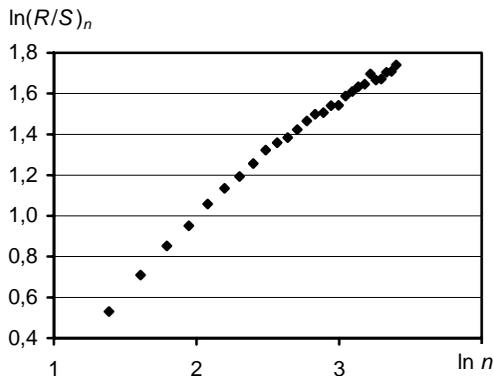


Рис. 1. Зависимость  $\ln(R/S)_n$  от  $\ln n$ .  
Москва, 2006—2010 гг.

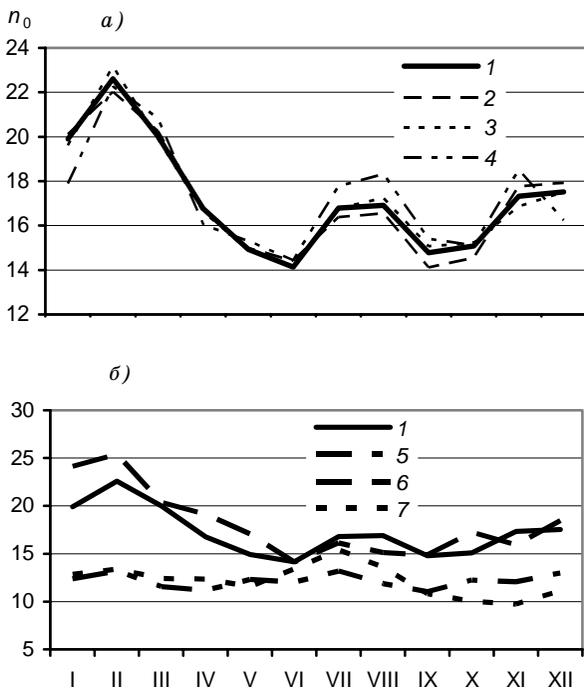


Рис. 2. Изменение времени персистентности в течение года для географически близких пунктов (а) и для городов, находящихся в разных климатических зонах (б).

1 — Москва, 2 — Коломна, 3 — Можайск, 4 — Кострома,  
5 — Анапа, 6 — Оймякон, 7 — Южно-Сахалинск.

Наибольший интерес представляет аналогичная картина для городов, находящихся в разных климатических зонах (рис. 2 б).

Кривая, соответствующая Москве, имеет характерные зимний и летний максимумы, определяющие достаточно стабильную погоду в эти периоды. При этом кривая для Оймякона демонстрирует максимум стабильности зимой и смазанную характеристику в летние месяцы. Показатели для Анапы характеризуют достаточно изменчивый климат, а кривая для Южно-Сахалинска демонстри-

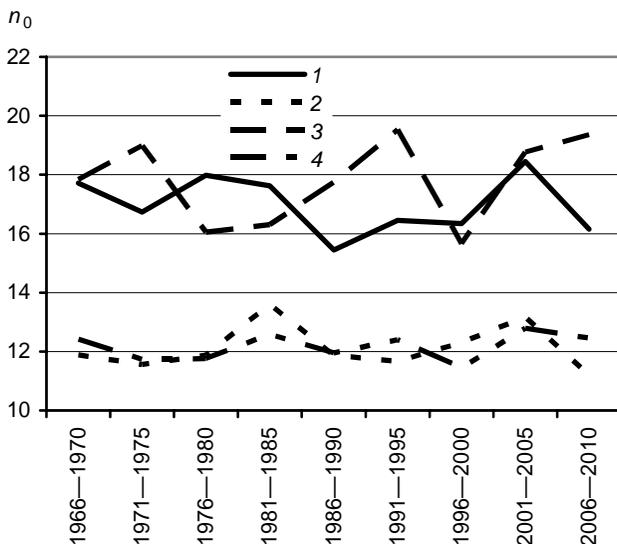


Рис. 3. Межгодовая изменчивость времени персистентности.  
 1 — Москва, 2 — Оймякон, 3 —Анапа, 4 — Южно-Сахалинск.

рует достаточно стабильное (по меркам Южно-Сахалинска) лето и существенные погодные перепады в осенний период.

Интерес представляет достаточно большая межгодовая вариабельность времени персистентности в континентальных регионах по сравнению с прибрежными, которые демонстрируют относительную стабильность данного показателя.

Помимо времени персистентности, интерес представляет фрактальная размерность ( $D$ ) кривой атмосферного давления при малых  $n$ :

Город.....	Оймякон	Москва	Анапа	Ю.-Сахалинск
$D$ .....	1,11	1,17	1,20	1,22

Из представленных данных видно, что детерминированность погодных условий в Оймяконе крайне высока ( $D$  близко к 1).

Приведенные примеры свидетельствуют об эффективности предлагаемых характеристик с точки зрения изучения и классификации климатических особенностей различных регионов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Hurst H.* (1951). Long term storage capacity of reservoirs / Transactions of the American Society of Civil Engineers, 116. P. 770—799.

*Mandelbrot B. B.* (1982). The fractal geometry of nature. — New York: W. H. Freeman.

*Peters E. E.* (1994). Fractal market analysis: applying chaos theory to investment and economics. — New York: Wiley.

УДК 551.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗНАЧИМОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

*Л. А. Майборода,<sup>1</sup> Л. И. Дивинский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Петровская академия наук и искусств  
199198 Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, 34, 112  
E-mail: geoobserver@yandex.ru

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет  
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98  
E-mail: divinsky@rshu.ru

Поступила в редакцию 9.09.2012

### Введение

Задача исследования значимости случайных возмущений при движении летательных аппаратов имеет как самостоятельное значение в исследованиях процессов движения летательных аппаратов в плотных слоях атмосферы, так и прикладное значение при многократном статистическом анализе траекторий движения летательных аппаратов в задачах оптимизации систем управления.

Необходимость исследования значимости случайных величин математической модели стохастического процесса, использующей представления случайных функций в виде канонических или неканонических разложений с непрерывными случайными величинами и описанной векторным нелинейным дифференциальным уравнением в формировании рассеивания фазовых координат относительно их невозмущенных (опорных) значений, возникает при решении задач численной оптимизации процессов управления движением летательных аппаратов в плотных слоях атмосферы при принятии решений о целесообразности оценки и прогноза как атмосферных возмущений, так и аэробаллистических параметров летательных аппаратов.

### Исследование значимости атмосферных возмущений

Если процесс движения летательного аппарата описан дифференциальным уравнением (Майборода, Школьный, 2010)

$$X = F(t, V, U, X), \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где  $V$  —  $m$ -мерный вектор некоррелированных непрерывных случайных величин с заданным законом распределения плотности вероятности, а качество процесса характеризуется некоторой функцией  $I = M[\varphi_1(X, T)]$ , то в силу зависимости решений уравнения (1) от элементов случайного вектора  $V: x_i(t, V)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) функция  $\varphi_1(X, T)$  в неявной форме зависит от случайных величин вектора  $V$  и имеет вид  $\varphi(V) = \varphi_1(X, T)$ .

Задача исследования значимости случайных величин  $v_i$  в формировании рассеивания функции  $\varphi(V)$  относится к задачам многофакторного анализа, развитию и приложению которого в различных областях техники посвящается в последние годы достаточно большое число работ (Кларк, 1988; Кочетков, Майборода и др., 1977; Майборода, Виленский, 1973; Пропой, 1973; Пшеничный, 1977; Рокафеллар, 1973). В основе методов многофакторного анализа функции  $\varphi(V)$  лежит задача получения некоторой модели функции  $\varphi(V)$  из условия наилучшего приближения модели к исследуемой функции  $\varphi(V)$ .

Представим функцию  $\varphi(V)$  полиномом

$$\hat{\varphi} = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i v_i + \sum_{i=1}^m a_{ij} v_i v_j + \dots \quad (2)$$

Задача построения аппроксимирующего полинома (2) может быть решена в рамках классического регрессионного анализа с помощью метода наименьших квадратов (Андерсон, 1963). Для этого, очевидно, необходимо сформировать некоторую последовательность случайного вектора

$$V^{(1)}, V^{(2)}, \dots, V^{(N)} \quad (3)$$

и для каждого из ее элементов путем интегрирования уравнения (1) вычислить функцию  $\varphi(V)$ , т. е. построить последовательность функции (выборку реализаций):

$$\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}, \dots, \varphi^{(N)}, \quad (4)$$

а затем обработать последовательности (3) и (4) с использованием соотношений для получения числового значения вектора  $A$  при модели  $\varphi(V)$ , а также для оценки точности аппроксимации функции  $\varphi(V)$  полиномом  $\hat{\varphi}(V)$  (Майборода, Школьный, 2010).

Построив полином (2), необходимо путем анализа его составляющих на множестве  $\Omega_v$  решить задачу оценки вклада каждой случайной величины в формирование рассеивания числового значения функции  $\varphi(V)$ .

Дисперсионный (Шеффе, 1963), компонентный (Андерсон, 1963) и факторный (Лоули, Максвелл, 1967) анализ, методы планирования и обработки результатов экспериментов (Крамер, 1948; Майборода, 1971; Налимов, Чернова, 1965; Хикс, 1967) позволяют решить задачу оценки вклада, вносимого случайными факторами (элементами вектора  $V$ ) в формирование рассеивания функции  $\varphi(V)$ .

Предположим, что построен полином первой степени

$$\hat{\varphi}(V) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i v_i \quad (5)$$

и вычислены статистические характеристики функции  $\varphi$

$$M[\varphi(V)], \quad M[\varphi^2(V)], \quad \sigma[\varphi(V)].$$

Получим оценки первых двух моментов функции  $\hat{\varphi}(V)$ , используя представление (5), в предположении о некоррелированности элементов вектора  $V$  и центрированности его элементов:

$$M[\hat{\varphi}(V)] = a_0,$$

$$M[\hat{\varphi}^2(V)] = a_0^2 + \sum_{i=1}^m a_i^2 M[v_i^2],$$

$$\sigma^2[\hat{\varphi}(V)] = \sum_{i=1}^m a_i^2 M[v_i^2]. \quad (6)$$

При нормальном и равновероятном ( $v_i \in [-b_i, b_i]$ ) распределении элементов случайного вектора  $V$  формулы (6) примут следующий вид:

$$M[\hat{\varphi}(V)] = a_0,$$

$$M[\hat{\varphi}^2(V)] = a_0^2 + \sum_{i=1}^m a_i^2 \sigma_i^2,$$

$$\sigma^2[\hat{\varphi}(V)] = \sum_{i=1}^m a_i^2 \sigma_i^2$$

и

$$M[\hat{\varphi}(V)] = a_0,$$

$$M[\hat{\varphi}^2(V)] = a_0^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^m a_i^2 \sigma_i^2,$$

$$\sigma^2[\hat{\varphi}(V)] = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^m a_i^2 \sigma_i^2.$$

Из выражений (6) следует, что вклад  $i$ -го фактора в формирование дисперсии функции  $\varphi(V)$  определяется выражением

$$\eta_i^{(1)} = a_i^2 M[v_i^2], \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

Введем коэффициент значимости для полинома первого порядка:

$$\delta \eta_i^1 = \frac{\eta_i^1}{\sigma^2[\varphi(V)]}. \quad (8)$$

В табл. 1 приведены выражения для формул (7) и (8) при нормальном и равномерном законах распределения элементов вектора  $V$ .

Таблица 1

Выражения для формул (7) и (8) при нормальном и равномерном законах распределения элементов вектора  $V$

Обозначение	Формула		
	Общая	При нормальном распределении	При равномерном распределении
$\eta_i^{(1)}$	$a_i^2 M[v_i^2]$	$a_i^2 \sigma_i^2$	$\frac{1}{3} a_i b_i^2$
$\delta \eta_i^{(1)}$	$\eta_i^1 / \sigma[\varphi]$	$a_i^2 \frac{\sigma_i^2}{\sigma^2[\varphi]}$	$\frac{1}{3} a_i^2 \frac{b_i^2}{\sigma^2[\varphi]}$

Аналогичные соотношения можно получить для полинома второй степени:

$$\hat{\varphi}(V) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i v_i + \sum_{i=1}^m a_{ij} v_i v_j. \quad (9)$$

Будем иметь

$$M[\hat{\varphi}] = a_0 + \sum_{i=1}^m a_{ij} M[v_i^2],$$

$$\begin{aligned} M[\hat{\varphi}^2(V)] &= a_0 + 2a_0 \sum_{i=1}^m a_{ii} M[v_i^2] + \sum_{i=1}^m a_i^2 M[v_i^2] + \sum_{i=1}^m a_{ii}^2 M[v_i^4] + \\ &+ 2 \sum_{i < j=1}^m a_{ii} a_{jj} M[v_i^2] M[v_j^2] + \sum_{i < j=1}^m a_{ij}^2 M[v_i^2] M[v_j^2], \end{aligned}$$

$$\sigma^2[\hat{\varphi}(V)] = \sum_{i=1}^m \left\{ a_i^2 M[v_i^2] + a_{ii}^2 M[v_i^4] - (M[v_i^2])^2 \right\} + \sum_{j < i=1}^m a_{ij}^2 M[v_i^2] M[v_j^2].$$

Введем обозначение

$$\bar{a}_{ij} = \bar{a}_{ji} = \frac{1}{2} a_{ij}.$$

Тогда получим следующее выражение для коэффициента  $\eta_i^{(2)}$ , характеризующего вклад  $i$ -го фактора в формирование дисперсии функции  $\varphi(V)$  по полиному второго порядка:

$$\eta_i^{(2)} = a_i^2 M[v_i^2] + a_{ii}^2 \left[ M[v_i^4] (M[v_i^2])^2 \right] + M[v_i^2] \sum_{i=1}^m \frac{a_{ij}^{-2}}{4} M[v_i^2]. \quad (10)$$

Коэффициент значимости определим по формуле

$$\delta\eta_i^{(2)} = \frac{\eta_i^{(2)}}{\sigma^2[\varphi]}.$$

Используя вычисленные коэффициенты  $\delta\eta^{(1)}$  и  $\delta\eta^{(2)}$ , можно разделить все случайные факторы на существенные и несущественные. Несущественные факторы в дальнейших исследованиях можно не учитывать. Из числа существенных факторов можно выделить слабо и сильно изменяющиеся факторы, т. е. факторы, по которым можно или воспользоваться линейной моделью, или строить более сложную нелинейную математическую модель. Для решения этой задачи необходимо сравнить линейную и нелинейную (квадратичную) модели исследуемой функции.

Коэффициент нелинейности определим с использованием соотношения

$$\delta\Delta\eta_i = \frac{\Delta\eta_i}{\eta_i^{(2)}}, \quad (11)$$

где

$$\Delta\eta_i = \eta_i^{(2)} - \eta_i^{(1)}. \quad (12)$$

Подставив (12) в соотношение (11), можно получить следующее выражение для оценки коэффициента нелинейности:

$$\delta\Delta\eta_i = 1 - \delta\Delta\bar{\eta}_i, \quad (13)$$

где

$$\delta\Delta\bar{\eta}_i = \frac{\eta_i^{(1)}}{\eta_i^{(2)}}.$$

В табл. 2 приведены основные расчетные соотношения для решения задачи оценки значимости случайных факторов с использованием модели второго порядка.

Вычислив числовые значения введенных коэффициентов  $\delta\Delta\bar{\eta}_i$ ,  $\delta\Delta\eta_i$ ,  $\delta\Delta\eta_i^{(1)}$ ,  $\delta\Delta\eta_i^{(2)}$ , можно решить задачу оценки вклада каждого случайного фактора в формирование рассеивания функции  $\varphi(V)$ . Если  $|\delta\Delta\eta_i| \leq \varepsilon$  (где  $\varepsilon$  — наперед заданное положительное число, определяемое требуемой точностью вычисления дисперсии функции), то  $i$ -й фактор можно считать слабо изменяющимся, в противном случае — сильно изменяющимся.

Наличие только линейной модели функции  $\varphi(V)$  также позволяет решить задачу выделения существенных и несущественных случайных факторов.

Если  $\delta\Delta\eta_i^{(1)}$  или  $\delta\Delta\eta_i^{(2)}$  меньше наперед заданного числа  $\delta$ , то  $i$ -м фактором можно пренебречь.

Остановимся кратко на выборе чисел  $\varepsilon$  и  $\delta$ .

Если ошибку вычислений принять случайной с нормальным законом распределения плотности вероятностей и заданными статистическими характеристиками  $M[\Delta\varphi] = 0$ ,  $D[\Delta\varphi] = \delta^2[\Delta\varphi]$ , то нижняя граница допустимых значений коэффициентов значимости может быть определена следующей зависимостью:

$$\varepsilon = \delta = \frac{\delta^2[\Delta\varphi]}{\delta^2[\hat{\varphi}]} a_{ij}.$$

Таблица 2

Основные расчетные соотношения для решения задачи оценки значимости случайных факторов с использованием модели второго порядка

Обозначение	Формула		
	Общая	При нормальном распределении	При равномерном распределении
$\eta_i^{(1)}$	$a_i^2 M[v_i^2]$	$a_i^2 \sigma_i^2$	$\frac{1}{3} a_i b_i^2$
$\delta \eta_i^{(1)}$	$a_i^2 M[v_i^2] +$ $+ a_{ii}^2 [M[v_i^4] - (M[v_i^2])^2] +$ $+ M[v_i^2] \sum_{j=1}^m \frac{a_{ij}^{-2}}{4} M[v_j^2]$	$a_i^2 \sigma_i^2 + 2 a_{ii}^2 \sigma_i^4 + \frac{\sigma_i^2}{4} \sum_{j=1}^m a_{ij}^{-2} \sigma_i^2$	$\frac{1}{3} a_i^2 b_i^2 + \frac{4}{45} a_{ii}^2 b_i^4 + \frac{1}{36} b_i^2 \sum_{j=1}^m a_{ij}^{-2} \sigma_i^2$
$\Delta \delta \eta_i^{(1)}$	$a_{ii}^2 [M[v_i^4] - (M[v_i^2])^2] +$ $+ M[v_i^2] \sum_{j=1}^m \frac{a_{ij}^{-2}}{4} M[v_j^2]$	$a_{ii}^2 \sigma_i^4 + \frac{\sigma_i^2}{4} \sum_{j=1}^m a_{ij}^{-2} \sigma_i^2$	$\frac{4}{45} a_{ii}^2 b_i^4 + \frac{1}{36} b_i^2 \sum_{j=1}^m a_{ij}^{-2} \sigma_i^2$

Верхняя граница допустимых значений названных коэффициентов может быть задана в соответствии с требованиями точности вычисления статистических характеристик функции  $\varphi$ .

Для того чтобы воспользоваться формулами (7)—(13), необходимо построить полином (5) с использованием регрессионного, компонентного, дисперсионного или факторного анализа. Поскольку изложению последних посвящено достаточно большое число работ в отечественной и зарубежной литературе, то представляется целесообразным изложить метод вероятностной аппроксимации для построения полинома (2). Метод вероятностной аппроксимации (Майборода, 1971) связан с вероятностным планированием эксперимента, что в большей степени отвечает специфике задач исследования нелинейных стохастических процессов:

- случайности факторов, определяющих течение процессов (1);
- большому числу факторов, при которых известные детерминированные схемы планирования эксперимента являются достаточно громоздкими в вычислительном отношении;
- использованию цифровых вычислительных устройств для решения задач исследования.

### **Заключение**

В настоящей работе показано, что, используя вычисленные коэффициенты значимости  $\delta\eta^{(1)}$  и  $\delta\eta^{(2)}$ , характеризующие вклад  $i$ -го фактора в формирование дисперсии исследуемой функции  $\varphi(V)$  по полиному первого и второго порядка соответственно, все случайные факторы можно разделить на существенные и несущественные. Несущественные факторы в дальнейших исследованиях можно не учитывать.

В свою очередь, из числа существенных факторов можно выделить слабо и сильно изменяющиеся факторы, т. е. факторы, по которым можно или воспользоваться линейной моделью, или строить более сложную нелинейную математическую модель. Для решения этой задачи необходимо сравнить линейную и нелинейную (квадратичную) модели исследуемой функции.

Вычислив числовые значения введенных коэффициентов нелинейности, можно решить задачу оценки вклада каждого случайного фактора в формирование рассеивания исследуемой функции  $\varphi(V)$ . Если коэффициент нелинейности  $\delta\Delta\eta_i$  по модулю меньше наперед заданного положительного числа, которое определяется требуемой точностью вычисления дисперсии функции, или равен ему, то  $i$ -й фактор можно считать слабо изменяющимся, в противном случае — сильно изменяющимся.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Андерсон Т.* (1963). Введение в многомерный статистический анализ. — М.: Физматгиз.

*Кларк Ф.* (1988). Оптимизация и негладкий анализ. — М.: Наука.

*Кочетков В. Т., Майборода Л. А., Пономарев В. М.* и др. (1977). Статистический анализ и оптимизация следящих систем. — М.: Машиностроение.

*Крамер Г.* (1948). Математические методы статистики. — М.: Изд.-во иностр. лит.

*Лоули Д., Максвелл А.* (1967). Факторный анализ как статистический метод. — М.: Наука.

*Майборода Л. А., Школьный Е. П.* (2010). Атмосфера и управление движением летательных аппаратов. — СПб: ВИТИ, с.246, с. 328—329.

*Майборода Л. А., Виленский Б. С.* (1973). Об использовании математической модели процесса свертываемости крови при лечении инфаркта мозга // Изв. АН СССР, Техн. Кибернетика. № 6.

*Майборода Л. А.* (1971). Об использовании метода наименьших интегральных квадратов в задачах анализа рассеивания нелинейных динамических систем / Труды Первой поволжской конференции по автоматическому управлению, Казань.

*Налимов В. В., Чернова Н. А.* (1965). Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М.: Наука.

*Пропой А. И.* (1973). Элементы теории оптимальных дискретных процессов. — М.: Наука.

*Пшеничный Б. Н.* (1977). О необходимых условиях экстремума для негладких функций // Кибернетика. № 6.

*Рокафеллар Р.* (1973). Выпуклый анализ. — М.: Мир.

*Хикс Ч.* (1967). Основные принципы планирования эксперимента — М.: Мир.

*Шеффе Г.* (1963). Дисперсионный анализ. — М.: Физматгиз.

УДК 551.5

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ПО ЛИНЕЙНОМУ ПРИБЛИЖЕНИЮ

*Л. А. Майборода,<sup>1</sup> Л. И. Дивинский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Петровская академия наук и искусств  
199198 Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, 34, 112  
E-mail: geoobservator@yandex.ru

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет  
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98  
E-mail: divinsky@rshu.ru

Поступила в редакцию 28.09.2012

### Введение

Как движение центра масс летательных аппаратов, так и движение их вокруг центра масс описывается нелинейными дифференциальными уравнениями (Майборода, Школьный, 2010). В зависимости от типа летательного аппарата, его назначения, конструктивных и аэродинамических особенностей в качестве системы нелинейных дифференциальных уравнений может быть принята одна из моделей, приведенных в работах Горбатенко и др. (1969) и Чернецкого (1968). Выбор системы координат в виде математической модели процесса управления движением летательных аппаратов чаще всего диктуется целью непосредственных исследований.

Важность задачи статистического анализа процессов управления движением летательного аппарата в плотных слоях атмосферы не подлежит сомнению.

### Метод статистического анализа нелинейных систем по линейному приближению

В зависимости от вида используемой модели случайной функции можно построить различные модели процесса управления. В работах Майбороды, Школьного (2010), Горбатенко и др. (1969), Чернецкого (1968) представлены следующие модели не-

линейных процессов управления, различающиеся методами статистического анализа:

1) общая модель стохастического процесса, описанного векторным нелинейным дифференциальным уравнением;

2) модель стохастического процесса, использующая представления случайных функций в виде канонических или неканонических разложений с непрерывными случайными величинами и описанная векторным нелинейным дифференциальным уравнением;

3) модель стохастического процесса, использующая представления случайных функций в виде канонических или неканонических разложений с некоррелированными дискретными случайными величинами и описанная векторным нелинейным дифференциальным уравнением;

4) модель стохастического процесса, использующая дифференциальную модель фильтра «белого шума» и описанная нелинейным дифференциальным уравнением.

Общая модель стохастического процесса описывается векторным нелинейным дифференциальным уравнением

$$\dot{X} = F(X, U\xi, t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где  $X$  —  $n$ -мерный вектор фазовых координат летательных аппаратов в выбранной системе координат;  $t$  — текущее время;  $\xi$  —  $l$ -мерный вектор возмущающих воздействий, включающий в себя функции, характеризующие флуктуации термодинамических параметров атмосферы;  $X_0$  —  $n$ -мерный вектор начальных условий фазовых координат;  $U$  —  $r$ -мерный вектор сил или моментов, управляющих движением летательных аппаратов.

В данном процессе флуктуации параметров атмосферы являются случайными функциями с заданными статистическими характеристиками  $M[\xi(t)]$ ,  $M[\xi(t)\xi^*(t)]$  и т. д. (звездочкой обозначено транспонирование).

Под задачей статистического анализа процессов управления будем понимать задачу вычисления математических ожиданий решений нелинейных уравнений, описывающих данные модели, вычисления математических ожиданий решений уравнения для линейной модели

$$\frac{\partial Y}{\partial \mu} = \tilde{A}(\mu)Y + \tilde{C}(\mu)\xi(\mu), \quad (2)$$

где

$$\mu = \varphi(X, U, \xi, t) \quad (3)$$

является функцией фазовых координат, управлений, возмущений и времени, и корреляционных матриц решений

$$R_{XX}(t) = M[X(t)X^*(t)]$$

или статистических характеристик (математических ожиданий, корреляционных матриц) некоторых функций от решений нелинейных стохастических уравнений.

Решение уравнения (2) для линейной модели процесса управления запишем в форме Коши:

$$Y(\mu) = \Phi(\mu)Y_0 + \Phi(\mu) \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi^{-1}(\tau)\tilde{C}(\tau)\xi(\tau)d\tau. \quad (4)$$

Предположим, что заданы матрица корреляций начальных условий

$$R_{YY}(\mu) = R_0 = M[Y_0Y_0^*] \quad (5)$$

и корреляционная матрица возмущающих воздействий — флуктуации параметров атмосферы

$$R_{\xi\xi}(t, \tau) = M[\xi(t)\xi^*(\tau)]. \quad (6)$$

Найдем корреляционную матрицу решений

$$R_{YY}(\mu, \mu) = M[Y(\mu)Y^*(\mu)],$$

используя решение уравнения (2) в форме (4).

Предполагая, что статистическая взаимосвязь между вектором начальных условий  $Y_0$  и вектором возмущений  $\xi(\mu)$  отсутствует, получим:

$$R_{YY}(\mu, \mu) = \Phi(\mu)R_0\Phi^*(\mu) + \int_{\mu_0}^{\mu} \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi(\mu)\Phi^{-1}(t)\tilde{C}(t)R_{\xi\xi}(t, \tau)\tilde{C}^*(\tau)[\Phi^{-1}(\tau)]^*\Phi^*(\mu)dtd\tau. \quad (7)$$

В выражениях (4) и (7) матрица  $\Phi(\mu)$  является фундаментальной матрицей решений дифференциального уравнения (2):

$$\dot{\Phi}(t) = \tilde{A}(t)\Phi(t), \quad \Phi(t_0) = E. \quad (8)$$

Вычисление корреляционной матрицы  $R_{YY}(\mu, \mu)$  с использованием выражения (7) связано с рядом трудностей, которые можно уменьшить, если использовать различные представления случайной функции (Майборода, Школьный, 2010). Тем не менее трудности остаются, поэтому в практике статистического анализа линейных систем находят применение корреляционные уравнения, связывающие между собой матрицу  $R_{YY}(\mu, \mu)$  с матрицами  $R_0$  и  $R_{\xi\xi}(t, \tau)$ .

Обозначив

$$\Psi = \tilde{C}(\mu)\xi(\mu),$$

запишем уравнение (2) в виде

$$Y' = \tilde{A}(\mu)Y + \Psi(\mu). \quad (9)$$

Легко показать, что для любой случайной вектор-функции  $\Psi(\mu)$ , имеющей все производные  $\psi^{(k)}$ , справедлива следующая корреляционная система дифференциальных уравнений, соответствующая уравнению (9):

$$R'_{YY} = \tilde{A}(\mu)R_{YY} + R_{YY}\tilde{A}^* + R_{Y\Psi} + R_{Y\Psi}^*,$$

$$R'_{Y\Psi} = \tilde{A}R_{Y\Psi} + R_{\Psi\Psi} + R_{Y\Psi'},$$

$$\begin{aligned}
R'_{Y\psi'} &= \tilde{A}R_{Y\psi'} + R_{\psi\psi'} + R_{Y\psi''}, \\
R'_{Y\psi''} &= \tilde{A}R_{Y\psi''} + R_{\psi\psi''} + R_{Y\psi''}, \\
R_{Y\psi^{(k)}} &= \tilde{A}R_{Y\psi^{(k)}} + R_{\psi\psi^{(k)}} + R_{\psi\psi^{(k+1)}}
\end{aligned} \tag{10}$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned}
R_{YY}(\mu_0) &= R_0, \\
R_{Y\psi}(\mu_0) &= R_{Y\psi'}(\mu_0) = \dots = R_{Y\psi^{(k)}}(\mu_0) = 0.
\end{aligned} \tag{11}$$

Система уравнений (10) связывает между собой корреляционные матрицы выходных характеристик процесса  $Y$  с корреляционными матрицами возмущений  $R_{\psi\psi}$ ,  $R_{\psi\psi'}$ , ...,  $R_{Y\psi^{(k)}}$  и матрицей исследуемой системы  $\tilde{A}$ . В общем случае системой (10) воспользоваться практически невозможно в силу ее бесконечности. Если окажется, что решение  $R_{Y\psi^{(k+1)}}$  тождественно равно нулю, тогда система уравнений (10) будет конечной системой корреляционных дифференциальных уравнений. Такую систему уравнений можно использовать для статистического анализа процесса по линейному приближению, т. е. по линейной модели (2).

Заметим, что при получении системы (10) использовались следующие преобразования:

$$\begin{aligned}
R'_{YY} &= M \left[ \frac{d}{d\mu} (YY^*) \right] = M [Y'Y^* + YY'^*] = \\
&= M [(\tilde{A}Y + \psi)Y^* + Y(\tilde{A}Y + \psi)^*] = \\
&= \tilde{A}R_{YY} + R_{YY}\tilde{A}^* + R_{Y\psi}^* + R_{Y\psi}, \\
R'_{Y\psi} &= M \left[ \frac{d}{d\mu} Y\psi^* \right] = M [Y'\psi^* + Y\psi'^*] = \\
&= M [(\tilde{A}Y + \psi)\psi^* + Y\psi'^*] = \tilde{A}R_{Y\psi} + R_{\psi\psi} + R_{Y\psi}^*
\end{aligned}$$

и т. д.

Рассмотрим возможность получения оценки слагаемого  $R_{Y\psi^{(k+1)}}$ . Для этого получим систему дифференциальных уравнений (10), используя решение уравнения (9) в форме (7), предварительно представив его в виде

$$R_{Y\psi}(\mu, \mu) = \Phi(\mu)R_0\Phi^*(\mu) + \int_{\mu_0}^{\mu} \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi(\mu)\Phi^{-1}(t)R_{\psi\psi}(t, \tau)[\Phi^{-1}(\tau)]^*\Phi^*(\mu)dt d\tau$$

или в виде

$$R_{YY}(\mu) = \Phi(\mu)\gamma(\mu)\Phi^*(\mu), \quad (12)$$

где

$$\gamma(\mu) = R_0 + \int_{\mu_0}^{\mu} \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi^{-1}(t)R_{\psi\psi}(t, \tau)[\Phi^{-1}(\tau)]^* dt d\tau. \quad (13)$$

Продифференцировав выражение (12), получим

$$R'_{YY}(\mu) = \Phi'(\mu)\gamma(\mu)\Phi^*(\mu) + \Phi(\mu)\gamma'(\mu)\Phi^*(\mu) + \Phi(\mu)\gamma(\mu)\Phi'^*(\mu).$$

Поскольку

$$\Phi' = \tilde{A}\Phi, \quad (\Phi')^* = \Phi^* A^*,$$

имеем

$$R'_{YY}(\mu) = \tilde{A}R_{YY} + R_{YY}\tilde{A}^* + \Phi(\mu)\gamma'(\mu)\Phi^*(\mu). \quad (14)$$

Введя обозначение

$$\varphi(\tau, \mu) = \int_{\mu_0}^{\mu} R_{YY}(\tau, \lambda)[\Phi^{-1}(\lambda)]^* d\lambda,$$

представим выражение (13) в следующей форме:

$$\gamma(\tau, \mu) = R_0 + \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi^{-1}(\tau)\varphi(\tau, \mu)d\tau$$

и проинтегрируем его по независимой переменной  $\mu^*$ :

$$\gamma'(\mu) = \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi^{-1}(\tau) \frac{\partial}{\partial \mu} \varphi(\tau, \mu) d\tau + \Phi^{-1}(\mu) \varphi(r = \mu, \mu).$$

Поскольку

$$\frac{\partial \varphi(\tau, \mu)}{\partial \mu} = \frac{\partial}{\partial \mu} \int_{\mu_0}^{\mu} R_{\psi\psi}(\tau, \lambda) [\Phi^{-1}(\lambda)]^* d\lambda = R_{\psi\psi}(\tau, \mu) [\Phi^{-1}(\mu)]^*,$$

то выражение для производной функции  $\gamma(\mu)$  имеет вид

$$\begin{aligned} \gamma'(\mu) &= \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi^{-1}(\tau) R_{\psi\psi}(\tau, \mu) d\tau [\Phi^{-1}(\mu)]^* + \\ &+ \Phi^{-1}(\mu) \int_{\mu_0}^{\mu} R_{\psi\psi}(\tau, \lambda) [\Phi^{-1}(\lambda)]^* d\lambda. \end{aligned}$$

Подставив полученное равенство в уравнение (14), получим следующее интегродифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} R'_{YY}(\mu) &= \tilde{A} R_{YY} + R_{YY} \tilde{A}^* + \Phi(\mu) \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi^{-1}(\tau) R_{\psi\psi}(\tau, \mu) d\tau + \\ &+ \int_{\mu_0}^{\mu} R_{\psi\psi}(\tau, \mu) [\Phi^{-1}(\tau)]^* d\tau \Phi^*(\mu), \end{aligned} \quad (15)$$

Введем обозначение

$$v(\mu) = \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi(\mu) \Phi^{-1}(\tau) R_{\psi\psi}(\tau, \mu) d\tau. \quad (16)$$

При условии, что

$$v^*(\mu) = \int_{\mu_0}^{\mu} R_{\psi\psi}^*(\tau, \mu) [\Phi^{-1}(\tau)]^* d\tau \Phi^*(\mu),$$

уравнение (15) примет следующий вид:

$$R'_{YY} = \tilde{A}R_{YY} + R_{YY}\tilde{A}^* + v(\mu) + v^*(\mu). \quad (17)$$

Величина  $v(\mu)$  представляет собой матрицу размерностью  $n \times n$ .

Продифференцировав выражение (16) по параметру  $\mu$ , находим:

$$v'(\mu) = \tilde{A}v(\mu) + R_{\psi\psi}\tilde{A}^* + v(\mu) + v^*(\mu),$$

где

$$v_1(\mu) = \Phi(\mu) \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi^{-1}(\tau) \frac{\partial}{\partial \mu} R_{\psi\psi}(\tau, \mu) d\tau. \quad (18)$$

Продолжив указанный процесс преобразований, получим бесконечную систему уравнений, характеризующую корреляционные преобразования:

$$\begin{aligned} R'_{YY} &= \tilde{A}R_{YY} + R_{YY}\tilde{A}^* + v(\mu) + v^*(\mu), \\ v'(\mu) &= \tilde{A}(\mu)v(\mu) + R_{\psi\psi}(\mu) + v_1(\mu), \\ v'_1(\mu) &= \tilde{A}(\mu)v_1(\mu) + R_{\psi\psi'}(\mu) + v_2(\mu), \\ v'_2(\mu) &= \tilde{A}(\mu)v_2(\mu) + R_{\psi\psi''}(\mu) + v_3(\mu), \\ v'_k(\mu) &= \tilde{A}(\mu)v_k(\mu) + R_{\psi\psi^{(k)}}(\mu) + v_{k+1}(\mu), \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$v_{k+1}(\mu) = \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi(\mu)\Phi^{-1}(\tau)M \left[ \psi(\tau) \frac{\partial^{(k)}}{\partial \mu^k} \psi(\mu) \right] d\tau.$$

По виду системы дифференциальных уравнений (10) и (19) совпадают, поэтому можно записать

$$R_{Y\psi^{(k+1)}}(\mu) = v_{(k+1)} = \int_{\mu_0}^{\mu} \Phi(\mu)\Phi^{-1}(\tau)M \left[ \psi(\tau) \frac{\partial^{(k)}}{\partial \mu^k} \psi(\mu) \right] d\tau. \quad (20)$$

Выражение (20) позволяет произвести оценку величины матрицы  $R_{Y\psi^{(k+1)}}$ , если воспользоваться данными о числовых характеристиках матрицы:

$$M \left[ \psi(\tau) \frac{\partial^{(k)}}{\partial \mu^k} \psi(\mu) \right] = R_{\psi\psi^{(k+1)}}(\tau, \mu).$$

Определим теперь выражения для  $M[\psi(\tau)\psi^{*(k)}(\mu)]$ . Для этого найдем производную произведения  $\psi(\tau)\psi^*(\mu)$ :

$$\frac{d}{d\mu} \psi(\tau)\psi^*(\mu) = \psi'(\tau)\psi^*(\mu) + \psi(\tau)\psi'^*(\mu). \quad (21)$$

Применим операцию математического ожидания к равенству (21), учитывая при этом, что операции математического ожидания и дифференцирования перестановочны. Получим

$$R'_{\psi\psi}(\mu) = R_{\psi'\psi^*} + R'_{\psi\psi'^*}.$$

Очевидно, что

$$R_{\psi'\psi^*}(\mu) = \frac{1}{2} R'_{\psi\psi'^*}. \quad (22)$$

Теперь определим вторую производную произведения  $\psi\psi^*$ :

$$\frac{d^2}{d\mu^2} \psi\psi^* = \psi''\psi^* + 2\psi'\psi'^* + \psi\psi''.$$

После проведения операции осреднения будем иметь

$$R''_{\psi\psi^*} = M[\psi''\psi^*] + M[\psi\psi''] + 2M[\psi'\psi'^*].$$

Поскольку

$$M[\psi'\psi'] = R_{\psi'\psi'} = R''_{\psi\psi^*},$$

получим:

$$R''_{\psi\psi^*} = 2M[\psi'\psi'^*] + R''_{\psi\psi^*},$$

откуда следует, что

$$R_{\psi'\psi'}(\mu) = \frac{1}{2}R'_{\psi\psi^*}. \quad (23)$$

Продолжая подобные преобразования, легко получить:

$$R_{\psi\psi''} = -R'''_{\psi\psi^*}. \quad (24)$$

По аналогии можно найти выражения вида (22)—(24) и для  $R_{\psi\psi^{(k)}}$ .

Статистический анализ флуктуации термодинамических характеристик атмосферы позволил произвести оценки величин  $R_{\psi\psi}$ ,  $R_{\psi\psi'}$ ,  $R_{\psi\psi''}$  и т. д.

Оказалось, что

$$R_{\psi\psi''} \ll R_{\psi\psi'} \ll R_{\psi\psi}.$$

Поэтому для процессов управления в атмосфере можно считать, что

$$R_{\psi\psi'} \approx R_{\psi\psi''} \approx \dots \approx R_{\psi\psi^{(k)}} \approx 0.$$

В связи с этим система корреляционных уравнений (19) значительно упрощается и приобретает вид

$$\begin{aligned} R'_{\gamma\gamma}(\mu) &= \tilde{A}(\mu)R_{\gamma\gamma}(\mu) + R_{\gamma\gamma}(\mu)\tilde{A}^*(\mu) + R_{\gamma\psi}(\mu) + R_{\gamma\psi}^*(\mu), \\ v'(\mu) &= \tilde{A}(\mu)v(\mu) + R_{\psi\psi}(\mu). \end{aligned}$$

Это справедливо и для системы уравнений (10), поэтому получим

$$\begin{aligned}
R_{YY}(\mu) &= \tilde{A}(\mu)R_{YY}(\mu) + R_{YY}(\mu)\tilde{A}^*(\mu) + R_{Y\psi}(\mu) + R_{Y\psi}^*(\mu), \\
R'_{Y\psi}(\mu) &= \tilde{A}(\mu)R_{Y\psi}(\mu) + R_{\psi\psi}(\mu), \\
R_{YY}(\mu_0) &= R_0, \quad R_{Y\psi}(\mu_0) = 0.
\end{aligned} \tag{25}$$

Следовательно, мы приходим к достаточно простым дифференциальным уравнениям, которые весьма удобны для статистического анализа процессов управления движением летательных аппаратов в атмосфере по линейной модели (2).

В работе Майбороды, Школьного (2010) показано, что в частном случае, когда возмущение является «белым шумом» с характеристикой

$$R_{\xi\xi}(t, \tau) = S(t)\delta(t - \tau), \tag{26}$$

из уравнений (25) вытекает известное корреляционное уравнение

$$R'_{YY}(\mu) = \tilde{A}(\mu)R_{YY}(\mu) + R_{YY}(\mu)\tilde{A}^*(\mu) + S(\mu).$$

Результаты исследований линейной модели (2) могут быть использованы в качестве первого приближения при исследовании нелинейных стохастических дифференциальных уравнений (1) процесса управления. Расчеты показали, что проведение корреляционного анализа нелинейных систем по линейной модели процесса управления движением летательных аппаратов достаточно эффективно.

### Заключение

Исследована возможность использования линейного приближения для статистического анализа нелинейных систем. Получены достаточно простые дифференциальные уравнения, которые весьма удобны для статистического анализа процессов управления движением летательных аппаратов в атмосфере по линейной модели. Результаты исследований линейной модели

могут быть достаточно эффективно использованы в качестве первого приближения при исследовании нелинейных стохастических дифференциальных уравнений процесса управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Чернецкий В. И.* (1968). Анализ точности нелинейных систем управления. — М.: Машиностроение.

*Горбатенко С. А.* и др. (1969). Механика полета. — М.: Машиностроение.

*Майборода Л. А., Школьный Е. П.* (2010). Атмосфера и управление движением летательных аппаратов. — СПб: ВИТИ. 572 с.

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТАТИСТИКИ ВОДНОСТИ ПОЛЕЙ ОБЛАКОВ НЕГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ

*Ю. А. Довгалюк<sup>1</sup>, А. А. Игнатъев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

E-mail: dovgaluk35@mail.ru, dovgaluk@main.mgo.rssi.ru

<sup>2</sup> ОАО «Санкт-Петербургский научно-исследовательский

и проектно-конструкторский институт «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»

191036 Санкт-Петербург, ул. 2-я Советская, 9/2а

E-mail: ignat2000@gmail.com

Поступила в редакцию 10.09.2012

Поступила после доработки 24.09.2012

### **Введение**

Знание функции распределения метеорологических параметров в облачных полях является ключевым моментом параметризации подсеточных процессов в моделях прогноза погоды и климата различных уровней в силу значительной изменчивости облачной фракции на всех масштабах. В частности, знание функции распределения водности в облачном поле позволяет достаточно точно прогнозировать среднюю водность в ячейке модели, что важно для расчета радиационных полей и скорости различных микрофизических процессов, которые носят часто нелинейный характер.

В отечественной литературе можно найти достаточно много данных, касающихся функции распределения облаков по размерам, повторяемости степени закрытия небосвода и средней водности облаков (Шметер, 1972; Матвеев, 2000; Матвеев, Матвеев, 1986), однако функция распределения (плотности вероятности) водности полей облаков, пожалуй, получена только в работе Синькевича (Синькевич, 2001) по результатам самолетных наблюдений.

В зарубежной литературе следует отметить, прежде всего, работу Sommeria, Deardorff (1977), где впервые было высказано

предположение о том, что функцией распределения водности в облаках является функция Гаусса. В исследовании Bougeault (1981) предложены варианты в виде функции Гаусса и убывающей экспоненты и проведен их анализ на основе сравнения с 3D расчетами; показано, что убывающая экспонента представляется наиболее подходящей. В работе Xu, Randall (1996) эта параметризация была проверена на основе имеющихся данных наблюдений и предложена некоторая модификация. В работе Larson et al. (2001) проведено довольно подробное исследование восьми различных форм таких функций, включая двойную дельта-функцию, гамма-функцию, функцию Гаусса и двойную функцию Гаусса, однако убывающая экспонента там не рассматривается. Авторы этой работы приходят к выводу о том, что гауссова параметризация, зависящая от двух параметров, неплохо подходит для аппроксимации наибольшего числа наблюдаемых данных, использовавшихся в их исследовании. Заметим, что в этой работе функция распределения строится для некоторой обобщенной величины, обозначенной авторами через  $s$ , которая может принимать как положительные, так и отрицательные значения (при  $s > 0$  она совпадает с водностью  $Q_1$ ).

Таким образом, единого устоявшегося мнения по поводу вида функции распределения водности в облачных слоях нет.

В настоящей работе представлены результаты численных исследований статистики поля водности с помощью LES моделирования. Показано, что функция распределения хорошо аппроксимируется убывающей экспонентой, имеющей на оси водности одну характерную точку излома, в которой скорость убывания экспоненты возрастает скачком. Предложены варианты аппроксимаций таких функций распределения для полей пассатных облаков и полей облаков в средних широтах.

## 1. Численная модель и постановка задачи

Подробное описание LES модели, используемой в исследовании, приведено в работах Cuijpers, Duynkerke (1993), Игнатьева (2011), Довгалюк, Игнатьева (2011), так что в этом разделе будет

приведено ее краткое описание. Модель основана на решении трехмерных уравнений гидродинамики несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска во вращающейся системе координат. В качестве подсеточной турбулентной модели используется модель Дирдорфа (Deardorff, 1980), содержащая одно дифференциальное уравнение для подсеточной кинетической энергии турбулентных пульсаций, а для вычисления водности применяется конденсационная схема (Sommeria, Deardorff, 1977).

Расчетная область представляет собой параллелепипед с горизонтальными размерами 5 км и вертикальным 3,5 км. На боковых границах ставились периодические граничные условия, верхняя граница — непроницаемая без трения, а на подстилающей поверхности задавались температура, полное влагосодержание и применялась параметризация Монины—Обухова для расчета потоков тепла, влаги и импульса (Матвеев, Матвеев, 2005).

В расчетах были рассмотрены два варианта облачных полей неглубокой конвекции: 1) поле облаков пассатной зоны (для условий эксперимента в районе острова Пуэрто-Рико 15 декабря 1972 г. (Pennell, LeMone, 1974)); 2) поле облаков средних широт с использованием данных радиозондирования в Ленинградской области 4 сентября 2011 г. В качестве начальной стратификации атмосферы задавались соответствующие вертикальные распределения потенциальной температуры, влажности и геострофического ветра. Для инициализации турбулентности в нижнем сеточном слое к потенциальной температуре добавлялись малые случайные возмущения, а вблизи верхней границы вводилась небольшая область с повышенной вязкостью для подавления нефизических гравитационных волн. Горизонтальные и вертикальные размеры расчетной ячейки были равны 50 и 25 м соответственно.

Приблизительно через один час физического времени после начала счета появлялись первые облака в областях, где турбулентные флуктуации влажности и температуры приводили к появлению насыщенной среды и ненулевой водности, а через два-три часа поле облаков приобретало вид, близкий к стационарному. Для обоих полей облаков степень закрытия небосвода составила 2—3 балла, а мощность — около 750 м. Высота нижней гра-

ницы облаков составила 600 и 1000 м в пассатной зоне и в средних широтах соответственно. Статистика водности набиралась по горизонтальной плоскости, расположенной посередине облачного слоя в течение 10 минут на момент 1, 2 и 3 ч времени развития облака после начала счета.

В следующем разделе приведены функции распределения водности, полученные в этом исследовании.

## 2. Функция распределения водности

По результатам расчетов было замечено, что профиль логарифма функции распределения (плотности вероятности) водности  $f(Q_1)$  довольно неплохо аппроксимируется прямой, имеющей один характерный излом в некоторой точке на оси водности  $Q_B$  (рис. 1). Это означает, что функция имеет вид убывающей экспоненты, и скорость убывания в точке  $Q_B$  скачком возрастает. Физически это может означать, что в облачном поле вероятность появления водности, превышающей  $Q_B$ , резко уменьшается. Если предположить, что бóльшие значения водности связаны с наиболее крупными облаками, то вероятность появления наиболее крупных облаков также резко уменьшается по сравнению с вероятностью появления облаков малых и средних размеров.

Как показали результаты расчетов, отмеченное поведение функции водности в целом характерно как для поля пассатных облаков, так и для поля облаков в средних широтах на всех этапах развития. Отсюда следует, что водность  $Q_B$  можно выбрать в качестве масштаба и использовать ее для приведения к безразмерному виду всех статистических характеристик. На рис. 2 показаны аналогичные функции распределения для поля облаков в средних широтах.

Заметим, что в случае рассматриваемых облачных полей степень закрытия небосвода была небольшой (2—3 балла), так что доля безоблачных промежутков была велика, как и повторяемость малых значений водности. В связи с этим функция распределения не имеет максимума. В слоистых и слоисто-кучевых об-

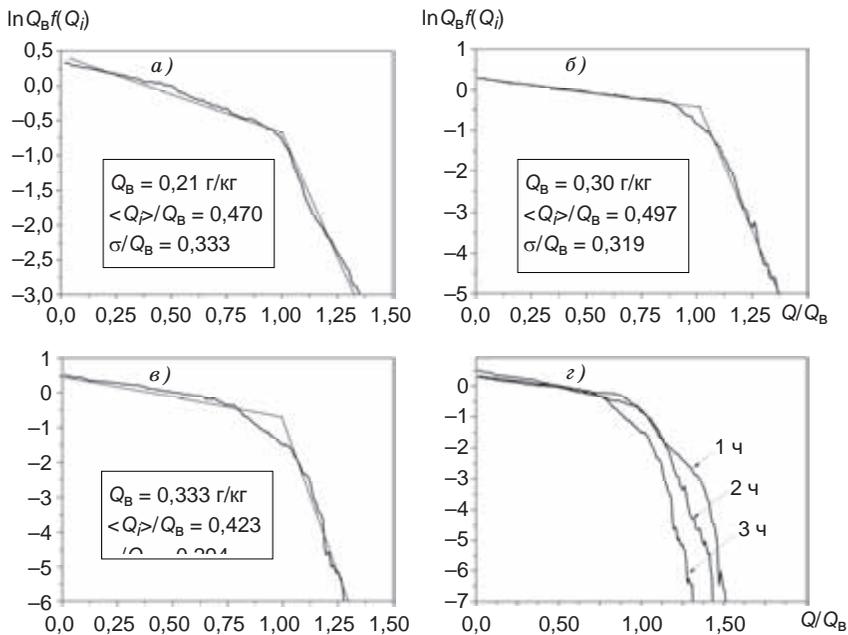


Рис. 1. Функция распределения водности.

*a—в* — результаты расчета поля облаков пассатной зоны через 1 ч после момента появления облаков (*a*), через 2 ч (*б*) и через 3 ч (*в*); *г* — динамика изменения функции распределения во времени. Приведены также средние значения водности и дисперсии.

лаках, закрывающих практически весь небосвод, вероятность как малых, так и больших значений водности мала, и функция распределения имеет максимум (моду). Так, на рис. 3 представлена функция распределения водности в слоисто-кучевых облаках, полученная в эксперименте ASTEX (Atlantic Stratocumulus Transition Experiment) (Larson et al., 2001), на которой виден максимум при водности около 0,23 г/кг. На рисунке приведены как сама функция, так и ее логарифм. График логарифма функции распределения (см. рис. 3 б) позволяет увидеть, что правое крыло функции также хорошо аппроксимируется убывающей экспонентой с одной точкой излома. Этот факт, однако, до сих пор не был замечен исследователями.

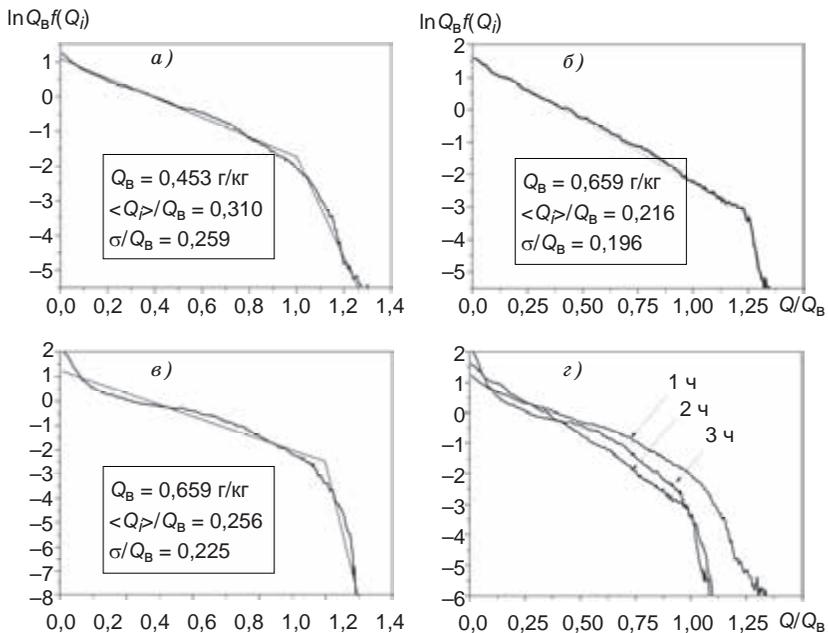


Рис. 2. Функция распределения водности для поля облаков в средних широтах.

Усл. обозначения см. рис. 1.

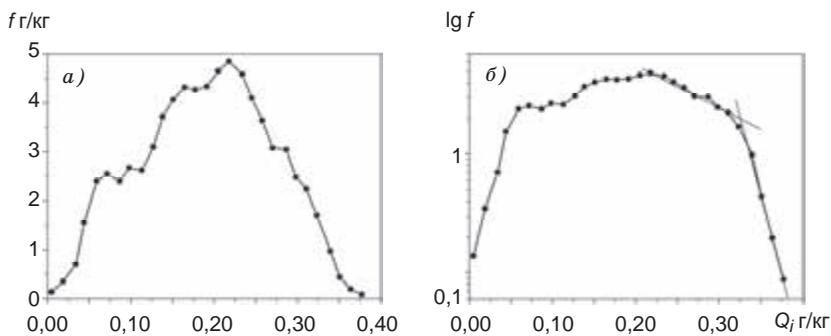


Рис. 3. Функция распределения водности (а) в слоисто-кучевых облаках и ее логарифм (б) по результатам эксперимента ASTEX (Larson et al., 2001).

Необходимо отметить, что приведенные в литературе функции распределения водности (полученные экспериментально) часто представляют собой интегральную функцию распределения

$$F(Q_l) = \int_0^{Q_l} f(z) dz$$

— накопленную повторяемость. Если учесть на-

личие характерной точки излома  $Q_B$ , то можно ввести две харак-

теристики:  $\int_0^{Q_B} f(Q) dQ$  и  $\int_{Q_B}^{\infty} f(Q) dQ$ , которые представляют собой

суммарную накопленную повторяемость водности ниже точки  $Q_B$  и выше точки  $Q_B$  соответственно. Сумма их равна 100 %. На рис. 4 приведено соотношение между этими характеристиками, полученными в расчете, для различных моментов времени.

Поскольку суммарная накопленная повторяемость водности выше точки излома очень мала (см. рис. 4), то этот излом не может быть обнаружен на графиках, особенно учитывая невысокую точность самолетных измерений водности (погрешность около 10 %).

На рис. 5 представлено сравнение накопленных повторяемостей по результатам расчета и экспериментальным данным, взятым из работы Синькевича (2001), где приведены экспериментальные результаты исследований облаков на Северо-Западе России.

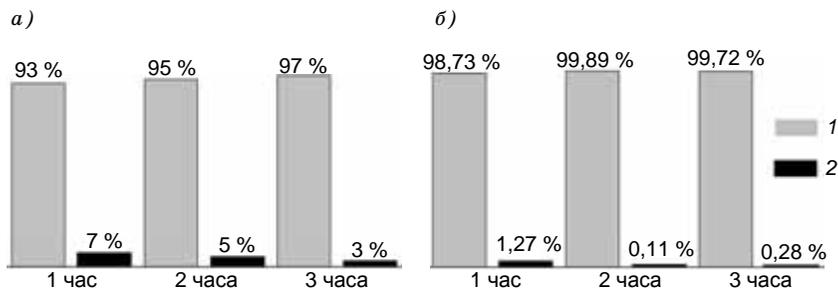


Рис. 4. Накопленная повторяемость водности ниже точки  $Q_B$  (1) и выше точки  $Q_B$  (2) для облаков пассатной зоны (а) и средних широт (б) в различные моменты времени жизни облака.

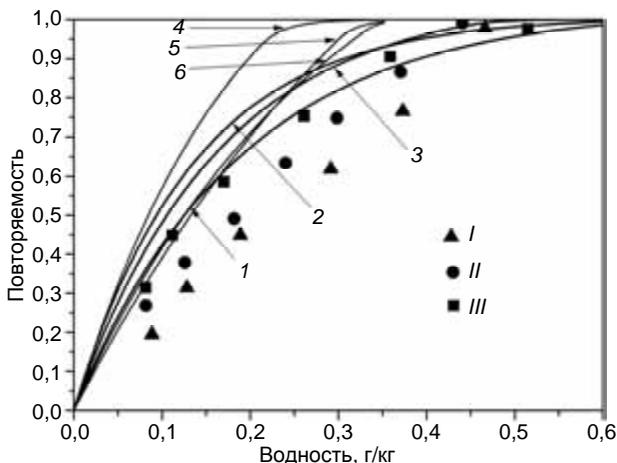


Рис. 5. Накопленные повторяемости водности: сравнение расчетных и экспериментальных значений.

1, 2 и 3 — результаты расчета поля облаков в средних широтах на моменты времени 1, 2 и 3 ч соответственно; 4, 5 и 6 — то же для поля пассатных облаков.

I—III — результаты эксперимента на Северо-Западе России (Синькевич, 2001): развитие (I), стабилизация (II), диссипация (III).

Из рис. 5 видно, что точки излома практически неразличимы на профилях повторяемости, особенно на экспериментальных. Исключение, возможно, составляет только расчетная кривая 4, для которой суммарная накопленная повторяемость водности выше  $Q_v$  относительно велика и составляет 7 % (пассатные облака). На этой кривой также можно увидеть небольшой перегиб в области значений водности 0,2—0,25 г/кг.

Поскольку LES моделирование обеспечивает гораздо более подробную статистику и бóльшую точность, в численном эксперименте можно обнаружить отмеченную особенность (точку излома) на профиле функции распределения. По результатам расчетов можно предложить следующий безразмерный вид логарифма функции распределения водности (функция нормирована на  $Q_v^{-1}$ ) для полей с небольшой степенью закрытия небосвода (до 2—3 баллов):

$$\ln[f(Q)Q_B] = \begin{cases} f_{01} - a_1 \frac{Q}{Q_B} & \text{при } Q < Q_B, \\ f_{02} - a_2 \frac{Q}{Q_B} & \text{при } Q > Q_B. \end{cases}$$

Константы этой аппроксимации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Константы аппроксимации для функции распределения водности

Константа	$Q_B$ г/кг					
	0,21	0,30	0,33	0,45	0,66	0,66
	1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч
	<i>Пассатная зона</i>			<i>Средние широты</i>		
$a_1$	1,12	0,686	1,15	2,76	4,82	3,50
$a_2$	7,18	12,9	20,0	14,5	37,5	40,8
$f_{01}$	0,43	0,27	0,49	1,07	1,58	1,28
$f_{02}$	6,50	12,47	19,4	12,8	34,2	38,6

Данная аппроксимация может использоваться в любых численных моделях, где требуется знание функции распределения для рассмотренных условий. Из таблицы видно, что облака в пассатной зоне характеризуются меньшим значением водности в точке излома (в среднем около 0,3 г/кг), чем в средних широтах (в среднем около 0,6 г/кг). Возможно, это различие как-то связано с разной высотой нижней границы облаков этих полей. Также наблюдается тенденция небольшого возрастания этой величины по мере развития облачного поля как в пассатной зоне, так и в средних широтах.

Необходимо заметить, что похожее поведение функции распределения отмечалось и при исследовании распределения облаков по размерам с помощью LES моделирования в работах Cahalan, Joseph (1989) и Neggers et al. (2003), где также выявляется излом функции распределения по размерам при некотором характерном размере облака. Однако в том случае функция распределения по размерам имела вид степенной функции, где показатель степени

менялся скачком в точке излома. Возможно, природа этих явлений одна и как-то связана с образованием турбулентных когерентных структур большого масштаба (порядка высоты подоблачного слоя) в подоблачном слое (Бедрицкий, 2009).

### Заключение

В настоящей работе проведено численное исследование поведения функции распределения водности в поле мелких кучевых облаков с помощью LES моделирования. Были рассмотрены облачные поля в пассатной зоне и в средних широтах. По результатам исследования выявлено, что логарифм функции распределения хорошо аппроксимируется прямой линией с одним характерным изломом по оси водности  $Q_B$ . Это означает, что функция распределения водности убывает по экспоненте, причем в точке излома скорость убывания изменяется скачком. Эта особенность отмечается во всех рассмотренных случаях, а также в некоторых экспериментальных данных. Физически это означает, что в облачном поле вероятность того, что водность превысит значение  $Q_B$ , резко уменьшается и, следовательно, уменьшается вероятность появления наиболее крупных облаков по сравнению с вероятностью появления облаков малых и средних размеров.

Для облачных полей в пассатной зоне значение водности в точке излома ( $Q_B$ ) близко к 0,3 г/кг, а в средних широтах — к 0,6 г/кг. При этом имеется тенденция к небольшому увеличению  $Q_B$  по мере развития облаков. Похожее поведение (наличие точки излома) обнаруживалось ранее исследователями также и для функции распределения облаков по размерам. Физическая причина такого поведения функции распределения не совсем ясна. Возможно, она как-то связана с образованием турбулентных когерентных структур большого масштаба в пограничном слое.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Т. 2. (2009) / Под ред. А. И. Бедрицкого. — СПб, Москва: Летний сад. 312 с.

Довгалюк Ю. А., Игнатъев А. А. (2011). К использованию LES модели для исследования характеристик полей кучевых облаков // Труды ГГО. Вып. 564. С. 126—146.

Игнатъев А. А. (2011). LES модель полей конвективных облаков // Труды ГГО. Вып. 564. С. 104—125.

Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л. (2005). Облака и вихри — основа колебаний погоды и климата. — СПб, изд. РГГМУ. 327 с.

Матвеев Л. Т. (2000). Физика атмосферы. — СПб: Гидрометеоиздат. 751 с.

Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л. (1986). Глобальное поле облачности. — Л: Гидрометеоиздат. 279 с.

Синькевич А. А. (2001). Конвективные облака северо-запада России. — СПб: Гидрометеоиздат. 105 с.

Шметер С. М. (1972). Физика конвективных облаков.— Л.: Гидрометеоиздат. 231 с.

Bougeault P. (1981). Modeling the trade-wind cumulus boundary layer. Part I: Testing the ensemble cloud relations against numerical data // J. Atmos. Sci. V. 38. P. 2414—2428.

Cahalan R. F., Joseph J. H. (1989). Fractal statistics of cloud field // Mon. Wea. Rev. V. 117. P. 261—272.

Cuijpers, J. W. M., Duynkerke, P. G. (1993). Large eddy simulation of trade cumulus clouds // J. Atmos. Sci. V. 50. P. 3894—3908.

Deardorff J. W. (1980). Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model // Boundary-Layer Meteorol. V. 18. P. 495—527.

Larson V. E., Wood R., Field P. R., Golaz J.-C., Haar T. H. V., Cotton W. R. (2001). Small-scale and mesoscale variability of scalars in cloudy boundary layers: one-dimensional probability density functions // J. Atmos. Sci. V. 58. P. 1978—1994.

Negers R. A. J., Jonker H. J. J., Siebesma A. P. (2003). Size statistics of cumulus cloud populations in large-eddy simulation // J. Atmos. Sci. V. 60, No. 15. P. 1060—1073.

Pennell, W. T., LeMone M. A. (1974). An experimental study of turbulence structure in the fire-weather trade wind boundary layer // J. Atmos. Sci. V. 31. P. 1308—1323.

Sommeria, G., Deardorff J. W. (1977). Subgrid-scale condensation in models of nonprecipitating clouds // J. Atmos. Sci. V. 34. P. 344—355.

Xu, K.-M., Randall D. A. (1996). Evaluation of statistically based cloudiness parameterizations used in climate models // J. Atmos. Sci. V. 53. P. 3103—3119.

**АНОМАЛИИ В ЗАПИСЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
ДЛЯ СЛУЧАЯ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ  
В АЛМАТИНСКОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ**

*Н. М. Салихов<sup>1</sup>, Я. В. Дробжева<sup>2</sup>, В. М. Краснов<sup>3</sup>,  
В. И. Дробжев<sup>1</sup>, Б. Т. Жумабаев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт ионосферы АО «НЦКИТ»  
480005 Алматы, Каменское плато, Казахстан  
E-mail: N1@nursat.net

<sup>2</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: ydrobzheva@mail.ru

<sup>3</sup> ВКА им. А. Ф. Можайского  
197082 Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13  
E-mail: vmkrasnov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.08.2012  
Поступила после доработки 30.09.2012

**Введение**

Известно, что перед землетрясениями регистрировались возмущения электрического поля, например, в суточных вариациях квазистатического электрического поля в приземной атмосфере (Руленко, 2000). В России на Камчатке (Руленко, 1992; Михайлов и др., 2002) и в Китае (Нао Jian-Guo et. al., 1998) за несколько часов до землетрясения наблюдалась отрицательная аномалия вертикальной составляющей напряженности электрического поля ( $E_z$ ) бухтообразной формы с резким передним фронтом и с последующим плавным возвращением к фоновому уровню в течение полутора часов. В работе Руленко (1993) отмечен аномальный выброс величины ( $E_z$ ) перед землетрясением с магнитудой  $M = 7,0$  положительной полярности.

Очевидно, что для выявления однозначной связи между рассматриваемыми явлениями необходим достаточно большой статисти-

стический материал для каждого конкретного сейсмического региона. В Казахстане в районе г. Алматы с 3 апреля 2011 г. проводятся непрерывные измерения напряженности электрического поля и микровариаций давления на радиополигоне «Орбита» Института ионосферы НЦКИТ, который расположен на высоте 2750 м над уровнем моря. 1 мая 2011 г. в 2 ч 31 мин 27,47 с на расстоянии 91,66 км от пункта наблюдения произошло капчагайское землетрясение (магнитуда  $m_b = 5,76$ ,  $m_{pv} = 5,34$ ,  $class = 13,30$  (Сейсмологический бюллетень НЯЦ, 2011)). Эпицентр землетрясения располагался в точке с координатами  $43,7149^\circ$  с. ш.,  $77,6582^\circ$  в. д.

В результате анализа данных был выявлен ряд особенностей электрического поля в период за несколько суток и часов до землетрясения. Очевидно, что на основе данных за один месяц с начала наблюдений нельзя сделать статистически значимых выводов о связи выделенных особенностей с процессами подготовки капчагайского землетрясения, поэтому непрерывные наблюдения были продолжены. В результате был получен и полностью обработан статистический материал по одновременным непрерывным записям электрического поля и микровариаций давления с 3 апреля 2011 г. по 15 июня 2012 г. Целью настоящей работы является исследование поведения выделенных особенностей электрического поля на основе полученного статистического экспериментального материала.

## **1. Прибор для регистрации электрического поля**

На радиополигоне «Орбита», расположенном на высоте 2750 м над уровнем моря, был создан и установлен электрометр — прибор, работающий по принципу измерения индуцированного заряда и ионной проводимости атмосферы. Электрометр позволяет регистрировать электромагнитный сигнал, возникающий при движении зарядов, а также решать задачи по обнаружению грозных явлений и электрических явлений, связанных с сейсмическими процессами, возникающими в период подготовки и осуществления землетрясений. Датчиком электрометра служит металлическая труба-антенна диаметром 25 мм и длиной около одного

метра. Антенна установлена вертикально и укреплена на фторопластовом изоляторе на высоте 4,5 м от поверхности Земли.

На верхний конец антенны надет токосъемник в виде «метелки», предназначенный для увеличения ионного тока атмосферного электричества, который состоит из 21 заостренной медной проволоки длиной 200 мм и диаметром 1,8 мм. Нижний конец антенны подключен к измерительному мосту, в одно из плеч которого включен полевой транзистор с изолированным затвором. К затвору полевого транзистора подключено сопротивление утечки номиналом 100 ГОм. В одну диагональ моста подается высокостабильный постоянный ток напряжением 5 В, а с другой диагонали снимается сигнал, пропорциональный силе тока в антенне. Этот сигнал проходит через симметричный фильтр нижних частот с постоянной времени около 0,05 с и далее подается на вход 24-разрядного аналогового цифрового преобразователя (АЦП) регистратора. Частота дискретизации данных с электрометра равна 100 Гц.

Оцифрованный сигнал в бинарном виде записывается в файл на жесткий диск компьютера. Синхронизация времени осуществляется по сигналам GPS или через Интернет от атомного стандарта частоты. Калибровка электрометра не проводилась из-за отсутствия соответствующих приборов и специального калибровочного стенда, поэтому все наблюдения за вариациями атмосферного электричества проводятся в относительных единицах. При этом масштаб измеряемой величины от сеанса к сеансу сохраняется, что дает возможность проследить изменение электрического поля со временем. Одновременно проводились измерения микровариаций атмосферного давления, дающие дополнительную информацию для идентификации источника возмущений электрического поля атмосферы.

Для примера на рис. 1 показана регистрация атмосферного электричества и инфразвука во время молниевых разрядов.

На рис. 2 представлен пример записи электрического поля в период с 18 апреля по 4 мая 2011 г.

Обращает на себя внимание мощный двухполярный импульс, появившийся в день перед землетрясением 30 апреля 2011 г., и

серии однополярных положительных импульсов практически одинаковой амплитуды. При этом частота излучения однополярных положительных импульсов резко возросла перед землетрясением, в результате чего импульсы, представленные на рис. 2, частично слились между собой.

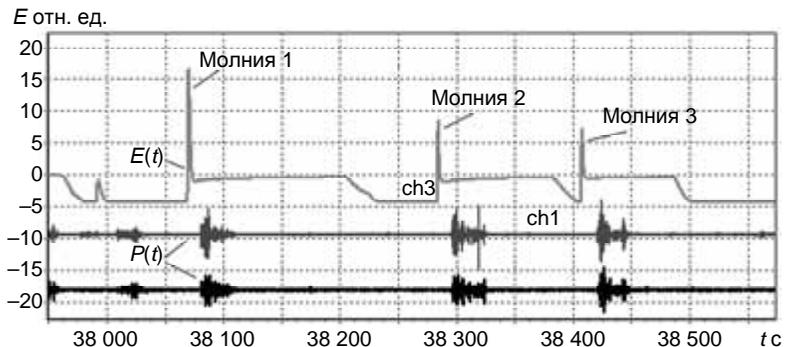


Рис. 1. Одновременная регистрация вариаций напряженности электрического поля атмосферы  $E(t)$  и инфразвуковых сигналов  $P(t)$  во время разрядов молний и ударов грома на радиополигоне «Орбита».

Время отсчитывается от начала суток (GMT) 17 июля 2011 г.

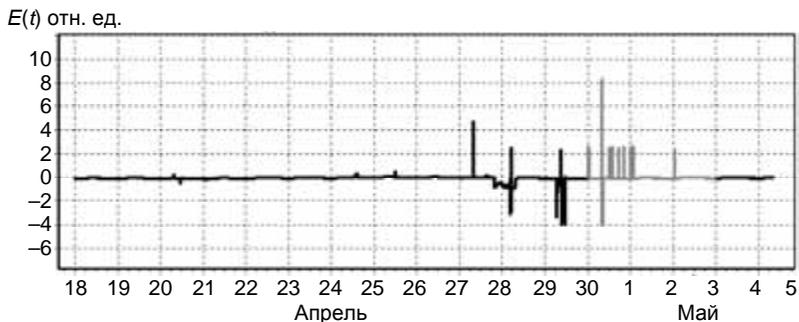


Рис. 2. Пример записи электрического поля за период с 18 апреля по 4 мая 2011 г. на радиополигоне «Орбита».

## 2. Возмущения электрического поля первого типа

Серия однополярных положительных импульсов практически одинаковой амплитуды длительностью 3—5 с (обозначим их как возмущения первого типа) наблюдалась примерно за сутки до землетрясения и закончилась за 40 мин до его начала. При этом частота излучения импульсов резко возросла перед началом землетрясения.

На рис. 3 представлена запись электрического поля за период с 30 апреля по 1 мая 2011 г. На рисунке также присутствует мощный двухполярный импульс, статистику регистрации которого рассмотрим отдельно. Для автоматизированного выделения положительных выбросов электрического поля была создана специальная программа.

Согласно сейсмологическому бюллетеню Национального ядерного института Республики Казахстан (НЯЦ РК), «афтершоковая активизация происходила в компактном объеме геологической среды изометричной формы, со всех сторон ограниченном разломами высокого порядка, субпараллельными и секущими Капчагай-Чиликский сдвиг... Линейные размеры основного об-

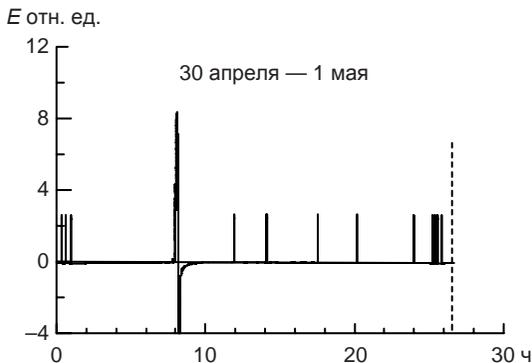


Рис. 3. Регистрация мощных импульсных выбросов электрического поля перед сильным землетрясением ( $m_b = 5,76$ ) 1 мая 2011 г.

Штриховая линия — момент землетрясения 1 мая 2011 г.

Начало отсчета времени — начало суток (GMT) 30 апреля 2011 г.

лака афтершоков в плане составляют  $10 \times 10$  км». Афтершоки, показанные на рис. 5, выбраны примерно в следующей области:  $43,576—43,723^\circ$  с. ш.,  $77,65—77,78^\circ$  в. д.

Анализ показал, что выделенный тип электрических импульсов наблюдался, по крайней мере, начиная с апреля по ноябрь 2011 г. При этом их число начиная с августа резко уменьшилось: в сентябре и октябре не было ни одного импульса, а в ноябре наблюдался лишь один импульс (рис. 4).

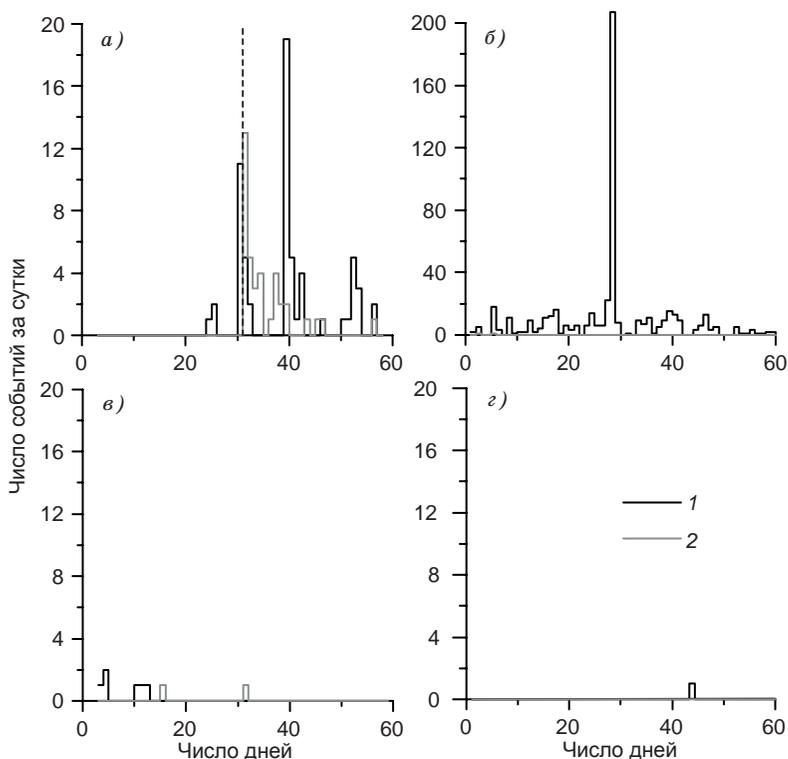


Рис. 4. Число зарегистрированных однополярных положительных импульсов за сутки в разные периоды 2011 г. и афтершоковая активность.

1 — число импульсов за сутки, 2 — число афтершоков с магнитудой от 2 до 7 в очаге за сутки. Штриховая линия — день землетрясения 1 мая 2011 г.  
 а) апрель—май, б) июнь—июль, в) август—сентябрь, з) октябрь—ноябрь.

В дальнейшем, начиная с декабря 2011 г. по 15 июня 2012 г., данный тип импульсов зарегистрирован не был. В то же время, землетрясения с магнитудой 2—7 наблюдались с мая по октябрь 2011 г.

Присутствие импульсов в апреле, мае и июне 2011 г. и их отсутствие в апреле, мае и первой половине июня 2012 г. свидетельствуют об отсутствии сезонной зависимости появления электрических импульсов. Кроме того, появление импульсов также не зависит от времени суток, и их нельзя связывать с грозовой активностью. Например, значительное увеличение числа импульсов перед землетрясением 30 апреля 2011 г. происходило в ясный день. Отдельного внимания заслуживают результаты наблюдений 28 июня 2011 г., когда за сутки было зарегистрировано 207 импульсов.

Суточная запись напряженности электрического поля и микровариаций давления за этот день представлена на рис. 5. Из рисунка

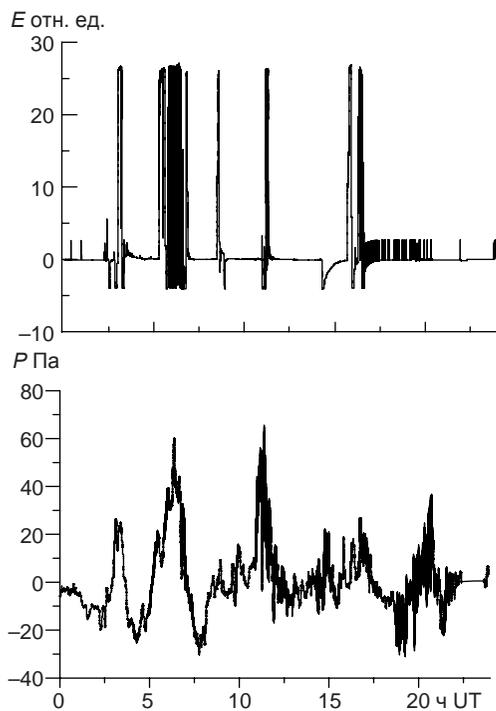


Рис. 5. Суточная запись напряженности электрического поля и микровариаций давления 28 июня 2011 г.

видно, что самые большие выбросы электрического поля в ряде случаев примерно совпадают по времени с пиками давления, что может быть обусловлено прохождением заряженного облака над радиополгоном. Импульсы первого типа наблюдаются с 0 до 2 ч и примерно с 16 ч до конца дня. В это время на записи микровариаций давления не отмечается никаких особенностей, которые можно было бы связать с появлением данных импульсов.

Для подтверждения сказанного на рис. 6 приведена часть записи в увеличенном масштабе по времени. В период с 15 ч 30 мин до 16 ч 30 мин видны два примерно одинаковых мощных выброса. Второй выброс после приблизительно 16 ч 50 мин оказался «заполненным» высокочастотной составляющей, которая плавно перешла после примерно 16 ч 30 мин в непрерывную последова-

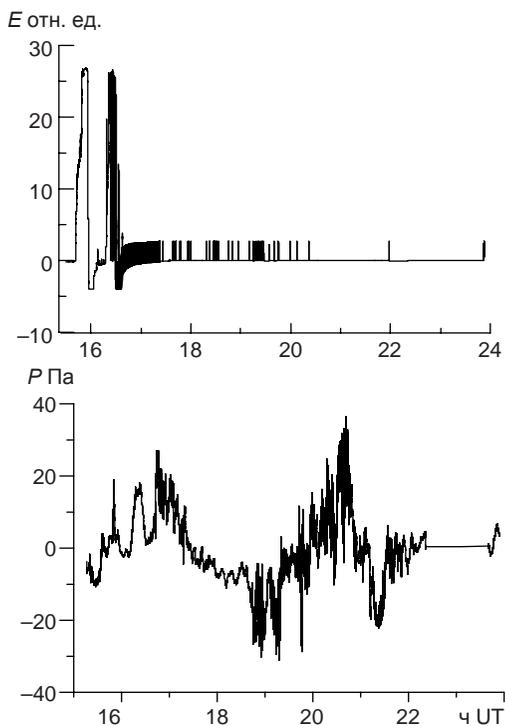


Рис. 6. Выделенный участок записи напряженности электрического поля и микровариаций давления за 28 июня 2011 г., приведенной на рис. 5.

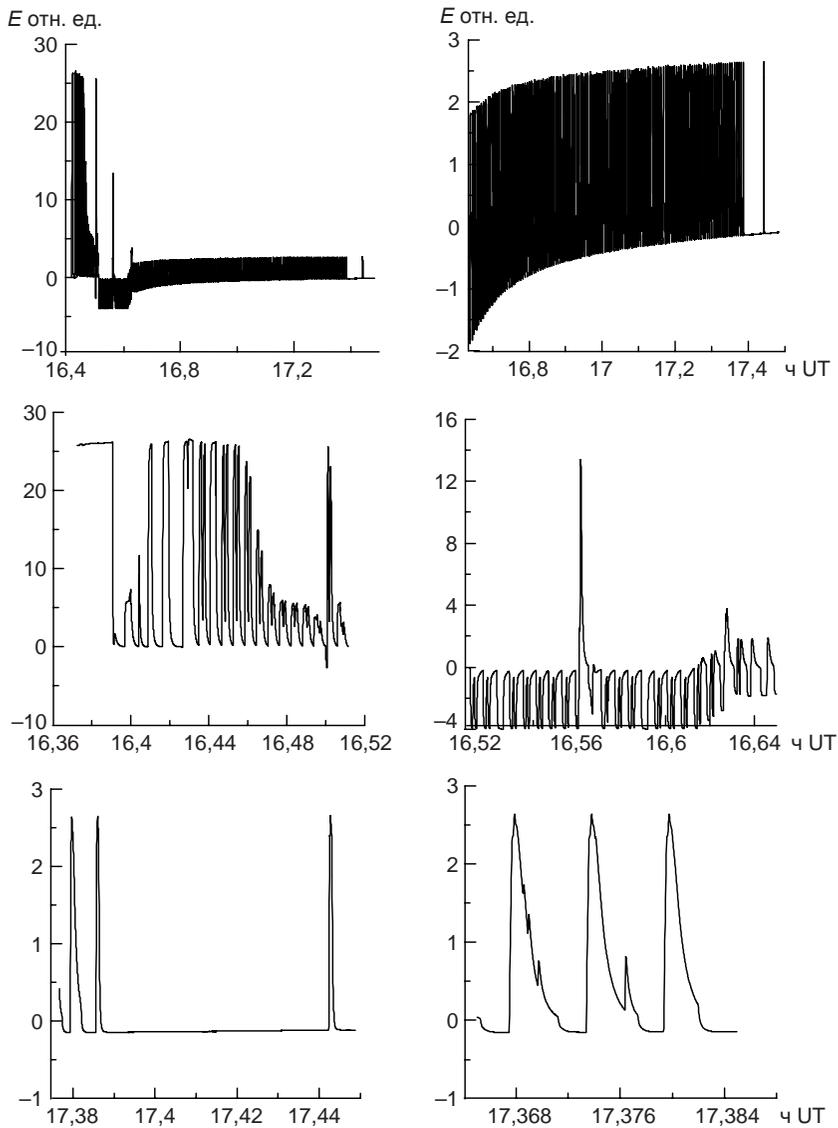


Рис. 7. Фрагменты записи напряженности электрического поля за 28 июня 2011 г., представленной на рис. 6.

тельность первого типа электрических импульсов, продолжающаяся примерно в течение часа. Это высокочастотное заполнение свидетельствует о «включении» дополнительного генератора импульсов. Данный отрезок записи и его отдельные фрагменты представлены на рис. 7.

Интересно отметить, что в вариациях геомагнитного поля, наблюдаемого на обсерватории «Алма-Ата» (находящейся на расстоянии 8 км от пункта регистрации «Орбита») не выявлены какие-либо особенности для данного временного интервала.

Проведенные эксперименты не позволяют пока однозначно связать выделенные электрические импульсы с процессами, происходящими в очаге капчагайского землетрясения. Однако очевидно, что процесс их генерации начался за несколько дней до рассматриваемого землетрясения, а закончился на месяц позже афтершоков с магнитудой 2—7 (не исключено, что землетрясения с меньшей магнитудой продолжались в очаге, однако информация о них не была представлена на сайте Центра данных НЯЦ РК).

### **3. Возмущение электрического поля второго типа**

Анализ экспериментальных данных перед землетрясением, а именно данных за 30 апреля 2011 г., позволил выделить двухполярный импульс электрического поля (обозначим его как возмущение второго типа) длительностью 1 ч 40 мин (рис. 8), появление которого было зарегистрировано примерно за 18,5 ч до землетрясения. При этом амплитуда положительного импульса составила около 8 отн. ед., а отрицательного — около 4 отн. ед. С помощью разработанной компьютерной программы был проведен поиск импульсов с подобными параметрами амплитуды и длительности, а также с одновременным расчетом коэффициента корреляции между исходным и вновь обнаруженными импульсами. Анализ суточных данных проведен за период с 5 апреля 2011 г. по 15 июня 2012 г.

На рис. 9 представлено изменение коэффициента корреляции в зависимости от дня года. Из рисунка видно, что величина коэффициента корреляции имеет сезонную зависимость: макси-

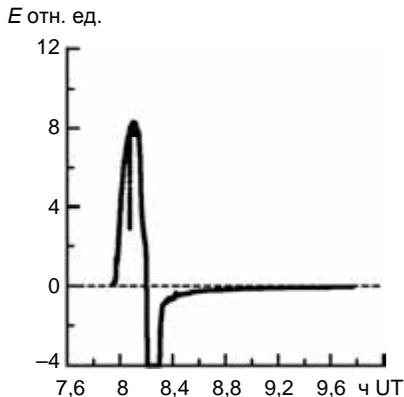
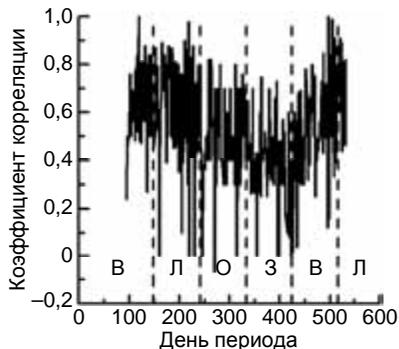


Рис. 8. Двухполярный импульс электрического поля, зарегистрированный 30 апреля 2011 г.

Рис. 9. Коэффициент корреляции между исходным и вновь обнаруженными импульсами в зависимости от дня года за период с 5 апреля 2011 г. по 15 июня 2012 г.

В, Л, О и З — весна, лето, осень и зима соответственно.



мальные значения приходятся на весну—лето 2011 г. и весну—лето 2012 г. Визуальный анализ обнаруженных с помощью программы двухполярных импульсов с коэффициентом корреляции 0,8 и более позволил отобрать те из них, которые по форме оказались наиболее близкими к импульсу, зарегистрированному перед землетрясением. Эти импульсы также имеют сезонную зависимость: в осенне-зимний период они не регистрировались. Кроме того, по сравнению с положительными импульсами первого типа длительностью 3—5 с число двухполярных импульсов за исследуемый период значительно меньше и составляет всего 13.

Несмотря на то что рассматриваемые импульсы в целом подобны тому, который был зарегистрирован перед землетрясением

30 апреля 2011 г., имеются и различия. Например, амплитуда как положительной, так и отрицательной части всех импульсов в два-три раза меньше амплитуды исходного импульса. Кроме того, 2 июля и 20 сентября 2011 г. зарегистрировано дополнительное возмущение на положительной части импульса, а 12 мая 2011 г. и 12 мая 2012 г. — на отрицательной.

Таким образом, амплитуда возмущения второго типа в данных электрического поля, зарегистрированного перед землетрясением, значительно превышает амплитуду подобных возмущений (импульсов), наблюдаемых в течение года после землетрясения. Этим они отличаются от возмущений первого типа, для которых характерно значительно большее постоянство амплитуды и длительности.

Для выяснения механизма возникновения рассматриваемых возмущений электрического поля проводился также анализ данных микровариаций давления. За исключением записей, полученных 12 мая и 3 июня, когда коэффициенты корреляции составили 0,7 и 0,64 соответственно, коэффициенты корреляции между вариациями электрического поля и микровариациями атмосферного давления невелики, что указывает на отсутствие линейной связи между этими явлениями.

#### **4. Возмущение электрического поля третьего типа**

Анализ экспериментальных данных позволил выделить также третий тип возмущения электрического поля бухтообразной формы длительностью 1 ч 12 мин (рис. 10), которое началось за 1 ч 43 мин и закончилось за 31 мин до землетрясения, произошедшего 1 мая 2011 г.

Из рисунка видно, что по сравнению с возмущениями первого и второго типов, амплитуда данного возмущения мала (на уровне фона), т. е. находится в пределах сотых долей условных единиц.

С помощью разработанной компьютерной программы был проведен поиск возмущений с подобной формой на основе расчета коэффициентов корреляции между исходной и текущей записью электрического поля. Анализ суточных данных проведен за

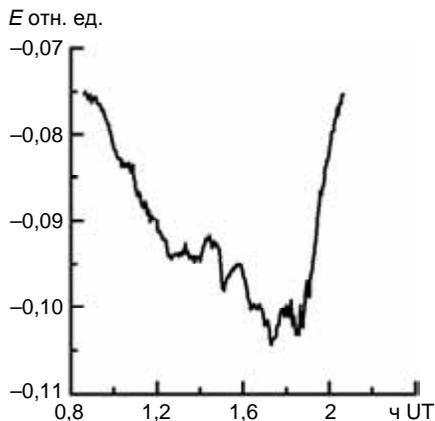


Рис. 10. Третий тип возмущения электрического поля по данным за 1 мая 2011 г.

период с 5 апреля 2011 г. по 15 июня 2012 г. Изменение коэффициента корреляции в зависимости от дня года представлено на рис. 11. Из рисунка видно, что, так же как и для возмущения второго типа, коэффициент корреляции имеет сезонную зависимость и ее максимальные значения приходятся на весну—лето 2011 г. и весну—лето 2012 г. Число возмущений данного типа с коэффициентом корреляции 0,95 и выше за весь период измерений составило 14.

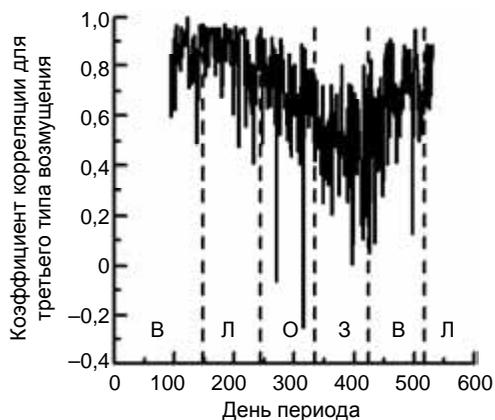


Рис. 11. Коэффициент корреляции между исходным и вновь обнаруженными бухтообразными возмущениями электрического поля в зависимости от дня периода с 5 апреля 2011 г. по 15 июня 2012 г.

Последний раз возмущение третьего типа с коэффициентами корреляции 0,95 и более было зарегистрировано 1 сентября 2011 г. Несмотря на хорошее совпадение по форме, исходное и обнаруженные после землетрясения возмущения различаются по знаку и значению напряженности электрического поля. Так, 22 апреля, 22 и 28 мая, 21 июня, 3 и 21 июля 2011 г. возмущение было расположено в положительной области, а в остальные дни, так же как и перед землетрясением, — в отрицательной. При этом амплитуда может превосходить величину бухтообразного возмущения, зарегистрированного перед землетрясением, на порядок.

Анализ записей вариаций давления, полученных одновременно с регистрацией возмущений третьего типа, а также рассчитанных значений коэффициента корреляции между вариациями электрического поля и атмосферного давления показал, что коэффициенты корреляции между возмущениями электрического поля третьего типа и микровариациями давления невелики. Это указывает на отсутствие линейной связи между этими явлениями. Исключение составляют дни 13 апреля, 28 мая и 10 июня, когда коэффициент корреляции составил 0,67; 0,63 и 0,66 соответственно.

Анализ имеющихся в литературе данных (Руленко, 2000) показал, что регистрируемые перед землетрясениями на фоне нормального или близкого к нормальному атмосферного электрического поля аномалии  $E$  по форме можно разделить на два основных типа. Аномалии первого типа имеют бухтообразную форму и отрицательный знак, а аномалии второго типа — форму пакета колебаний с некоторым набором частот. Предложены механизмы образования этих аномалий: соответственно квазистатический газоэлектрический и динамический механоэлектрический. Первый механизм связан с увеличением содержания в приземном воздухе основного естественного ионизатора  $^{222}\text{Rn}$  в результате увеличения его потока с поверхности Земли и возникновением известного в атмосферном электричестве явления образования отрицательного объемного электрического заряда («реверс электродного эффекта»).

Таким образом, отрицательное бухтообразной формы возмущение электрического поля, наблюдавшееся перед капчагайским

землетрясением, является еще одним подтверждением возможной связи между сейсмическими процессами и возмущениями электрического поля.

### Заключение

Перед капчагайским землетрясением (магнитуда  $m_b = 5,76$ ,  $m_{rv} = 5,34$ ,  $class = 13,30$ ), произошедшем 1 мая 2011 г. в 2 ч 31 мин 27,47 с на расстоянии 91,66 км от пункта наблюдения, на записях напряженности электрического поля были выявлены три типа возмущений. Первый тип — однополярные положительные импульсы практически одинаковой амплитуды длительностью 3—5 с, зарегистрированные за несколько дней до землетрясения. Второй тип — двухполярный импульс длительностью 1 ч 40 мин, зарегистрированный приблизительно за 18,5 ч до землетрясения. Третий тип — бухтообразное возмущение длительностью 1 ч 12 мин, которое началось за 1 ч 43 мин и закончилось за 31 мин до начала землетрясения.

Для выяснения возможной связи данных возмущений с процессами подготовки землетрясения были проведены обработка и анализ статистического материала по одновременным суточным записям электрического поля и микровариаций давления с 3 апреля 2011 г. по 15 июня 2012 г. Исследования показали, что процесс генерации возмущений первого типа начался за несколько дней до капчагайского землетрясения и закончился на месяц позже появления афтершоков, имеющих магнитуду 2—7. Возмущения электрического поля второго типа (двухполюсный импульс), которые коррелируют с возмущением, зарегистрированным на радиополигоне «Орбита» перед землетрясением с коэффициентом 0,8 и более, имеют сезонную зависимость, однако их амплитуда в два-три раза меньше амплитуды возмущения, наблюдавшегося 1 мая 2011 г. примерно за 1 ч 40 мин до землетрясения. Возмущения третьего типа с коэффициентом корреляции 0,95 и более с возмущением, зарегистрированным за 1 ч до землетрясения, появлялись еще 14 раз, и последнее было зарегистрировано 1 сентября 2011 г. — на один месяц раньше, чем пре-

кратились афтершоки с магнитудой 2—7. Кроме того, для всех трех типов возмущений электрического поля коэффициенты корреляции с возмущениями микровариаций атмосферного давления оказались незначительными.

Таким образом, особенности поведения выявленных трех типов возмущений электрического поля не исключают возможность их связи с процессами, сопутствующими капчагайскому землетрясению, и соответственно возможности разработки новых методов краткосрочного прогноза землетрясений. Однако для достоверных выводов о связи указанных явлений необходимы дальнейшие статистические исследования с привлечением других экспериментальных данных.

*Работа выполнена в рамках договора с Научным центром космических исследований и технологий Республики Казахстан, контракт № 06-АО от 22 февраля 2012 г.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В., Денуева А. Х., Бузевич А. В., Дружин Г. И., Смирнов С. Э., Фирстов П. П. (2002). Вариации различных атмосферно-ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке: предварительные результаты // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42, № 6. С. 805—813.

Руленко О. П. (2000). Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. № 4. С. 57—68.

Руленко О. П., Дружин Г. И., Вершинин Е. Ф. (1996). Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед камчатским землетрясением 13.11.1993 г., М = 7.0 // Доклады РАН. Т. 348, № 6. С. 814—816.

Руленко О. П., Иванов А.В., Шумейко А. В. (1992). Краткосрочный атмосферно-электрический предвестник камчатского землетрясения 6 марта, М = 6.1 // Доклады РАН. Т. 326, № 6. С. 980—982.

Сейсмологический бюллетень за 30 апреля и 1 мая 2011 г. ЦСОССИ ИГИ НЯЦ Республики Казахстан. [www.kndc.kz](http://www.kndc.kz).

Нao Jian-Guo, Tang Tian-Ming, Li De-Rui (1998). A kind of information on short-term and imminent earthquake precursors: research on atmospheric electric field anomalies before earthquakes // Acta Seismologica Sinica. V. 11, № 1. P. 121—131.

## ВЛИЯНИЕ КРИПТОНА-85, РАДОНА И ПРОДУКТОВ ЕГО РАСПАДА НА СТРУКТУРУ ЭЛЕКТРОДНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

*В. Н. Морозов<sup>1</sup>, М. Шапкалиевски<sup>2</sup>, Л. Р. Орленко<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет  
195195 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

Поступила в редакцию 7.08.2012  
Поступила после доработки 1.11.2012

### Введение

Влияние радиоактивных веществ на электрическое состояние атмосферы рассматривалось с экспериментальной точки зрения в работах Israelson, Knudsen (1986), Dyachuk et al. (1992). В работе Воеск (1975) даны теоретические оценки изменения электрической проводимости атмосферы при выбросе в атмосферу радиоактивного газа Kr-85. В работе Willet (1985) построена теоретическая модель электрических процессов в пограничном слое атмосферы, учитывающая влияние радона <sup>222</sup>Rn и продуктов его распада.

В настоящей работе рассматривается влияние радиоактивной субстанции <sup>222</sup>Rn и продукта его распада полония <sup>218</sup>Po, а также криптона Kr-85 на структуру электродного приземного слоя. Задача рассмотрена в предположении, что интенсивность ионообразования, создаваемая эти веществами, превышает фоновую интенсивность ионообразования, создаваемую галактическими космическими лучами и радиоактивными веществами, выделяемыми земной поверхностью. Приведены результаты численных расчетов распределений концентрации радиоактивных веществ,

концентрации легких ионов, электрической проводимости и связанной с ней напряженности электрического поля в зависимости от высоты для случая стационарного одномерного электродного приземного слоя.

### 1. Математическая модель

Рассмотрим сначала распределение с высотой радиоактивных субстанций в приземном слое атмосферы в стационарном одномерном приближении. Уравнения, описывающие это распределение, имеют следующий вид:

для радона и криптона

$$-\frac{d}{dz} D_{Tz} \frac{dQ(z)}{dz} + \frac{Q}{\tau} = 0, \quad (1)$$

для полония

$$-\frac{d}{dz} D_{Tz} \frac{dQ_{Po}(z)}{dz} + \frac{Q_{Po}(z)}{\tau_{Po}} = \frac{Q_R(z)}{\tau_R}, \quad (2)$$

где  $D_{Tz}(z)$  — коэффициент турбулентной диффузии:  $D_{Tz}(z) = D_m z^m$ ,  $m = 0, 1, 4/3$  (устойчивая, нейтральная и конвективно неустойчивая стратификации);  $\tau$  — период полураспада радиоактивной субстанции, который равен  $\tau_R$  в случае радона и  $\tau_{Kr}$  в случае криптона-85;  $Q_R/\tau_R$  — интенсивность источника для концентрации полония, обусловленная присутствием радона;  $\tau_{Po}$  — период полураспада полония.

Представление для коэффициента турбулентной диффузии следует из работ Мони́на, Обухова (1954), Ламли, Пановского (1966), Зилитинкевича (1970), Орленко (1979).

Общее решение уравнения (1), полученное в работе Yordanov (1968) при граничных условиях  $Q(z = z_0) = Q_0$ ,  $Q(z \rightarrow \infty) = 0$  имеет следующий вид:

$$Q(z) = Q_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1-m}{2}} \frac{K_v(\eta)}{K_v(\eta_0)}, \quad (3)$$

где  $v = \frac{1-m}{2-m}$ ,  $\eta = \sqrt{\frac{1}{\tau D_m}} z^{\frac{2-m}{2}}$ ,  $K_v(\eta)$  — функция Макдональда,

$z_0$  — параметр шероховатости земной поверхности.

Поскольку  $\tau_R \gg \tau_{P_0}$ , то можно считать концентрацию радона  $Q_R$  в приземном слое постоянной. Тогда, решив уравнение (2) при граничных условиях

$$Q_{P_0}(z = z_0) = Q_{P_0}^0, \quad Q_{P_0}(z \rightarrow \infty) = \frac{Q_R \tau_{P_0}}{\tau_R}, \quad (4)$$

получим:

$$Q_{P_0}(z) = \frac{Q_R \tau_{P_0}}{\tau_R} \left[ 1 - \gamma \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1-m}{2}} \frac{K_v(\eta)}{K_v(\eta_0)} \right], \quad \gamma = 1 - \frac{Q_{P_0} \tau_R}{Q_R \tau_{P_0}}. \quad (5)$$

Если  $\gamma = 1$ , то  $Q_{P_0}^0 = 0$ , и если  $\gamma = 0$ , то  $Q_{P_0}^0 = \frac{Q_R \tau_{P_0}}{\tau_R}$ . В общем

случае  $0 < \gamma < 1$ , и требуется привлечение экспериментальных данных для определения этой величины.

Используя выражения (3) и (5), можно определить интенсивность ионообразования, создаваемую радонотом и полонием:

$$q(z) = \frac{Q_R E_R}{\tau_R w_{\text{ион}}} + \frac{Q_R E_{P_0}}{\tau_R w_{\text{ион}}} \left[ 1 - \gamma \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1-m}{2}} \frac{K_v(\eta)}{K_v(\eta_0)} \right], \quad (6)$$

где  $E_R$  и  $E_{P_0}$  — энергии  $\alpha$ -частиц, возникающих при распаде радона и полония ( $E_R = 5,48$  МэВ,  $E_{P_0} = 6,00$  МэВ);  $w_{\text{ион}}$  — энергия, необходимая для образования одной пары ионов ( $w_{\text{ион}} \approx 32,3 \dots 33,9$  эВ).

Аналогично для криптона получим:

$$q_{\text{Kr}}(z) = \frac{Q_{\text{Kr}} E_{\text{Kr}}}{\tau_{\text{Kr}} w_{\text{ион}}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{\text{Kr}}(z), \quad (7)$$

где  $E_{\text{Kr}}$  — энергия  $\beta$ -частиц, возникающих при распаде криптона и равная 0,25 МэВ.

Примеры расчетов вертикального распределения интенсивности ионообразования, создаваемой радоном, полонием и криптоном, приведены на рис. 1. Численные значения параметров для этих расчетов проведены в табл. 1.

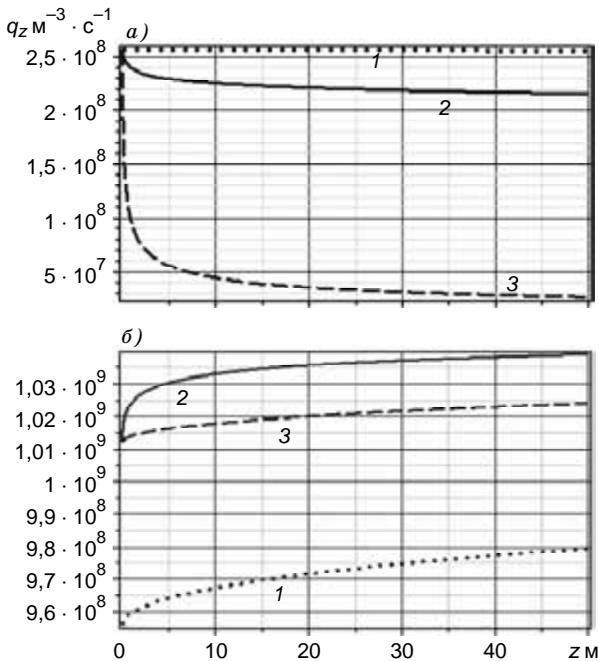


Рис. 1. Вертикальное распределение интенсивности ионообразования  $q(z)$ , обусловленной повышенной концентрацией радиоактивных веществ:  $^{85}\text{Kr}$  (а) и  $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$  (б).

1 — устойчивая стратификация, 2 — нейтральная, 3 — неустойчивая.

Таблица 1

**Значения параметров, используемых при расчете вертикального  
распределения интенсивности ионообразования**

$$\begin{array}{l}
 D_0 = 0,2 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\
 D_1 = 0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \\
 D_{4/3} = 0,32 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 \tau_{\text{Kr}} = 3 \cdot 10^8 \text{ с} \\
 \tau_{\text{R}} = 3 \cdot 10^5 \text{ с} \\
 T_{\text{Po}} = 180 \text{ с}
 \end{array} \right.
 \left| \begin{array}{l}
 z_a = 0,05 \text{ м} \\
 w_{\text{ион}} = 32,5 \text{ эВ}
 \end{array} \right.
 \left| \begin{array}{l}
 E_{\text{Kr}} = 0,25 \text{ МэВ} \\
 E_{\text{R}} = 5,4 \text{ МэВ} \\
 E_{\text{Po}} = 6 \text{ МэВ}
 \end{array} \right.$$

Используя уравнения для интенсивности ионообразования, можно записать уравнения, которые определяют вертикальное распределение концентрации положительных ( $n_1$ ) и отрицательных ( $n_2$ ) легких ионов:

$$-\frac{d}{dz} \left[ D_{Tz}(z) \frac{dn_{1,2}}{dz} \right] = q(z) - \beta_{1,2} n_{1,2} N, \quad (8)$$

где  $N$  — концентрация аэрозольных частиц,  $\beta_{1,2}$  — коэффициенты присоединения легких ионов к аэрозольным частицам.

В уравнении (8) предполагается, что, во-первых, оно записано для интенсивного турбулентного перемешивания, когда роль электрического поля в переносе ионов мала, а основную роль играет перенос за счет турбулентного перемешивания (Куповых и др., 1998; Морозов, 2011). Влияние турбулентного перемешивания определяется безразмерным параметром

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| E_{\infty} \tau}{(D_m \tau)^{1/2-m}},$$

где  $b_{1,2}$  — подвижность положительных и отрицательных ионов;  $\tau$  — время жизни ионов, определяемое процессами рекомбинации. Сильное турбулентное перемешивание определяется условием  $\xi_{1,2} \ll 1$ . Во-вторых, при записи правой части уравнения предполагалось, что потери ионов за счет присоединения ионов к аэрозольным частицам превышают потери за счет рекомбинации

ионов, т. е.  $\beta_{1,2} N n_{1,2} \gg \alpha n_{1,2}^2$ , где  $\alpha$  — коэффициент рекомбинации легких ионов.

Решая уравнение (8) при следующих граничных условиях:

$$n_{1,2}(z_0) = n_{1,2}^0, \quad n_{1,2}(z \rightarrow \infty) = \frac{q_R + q_{P_0}^0}{\beta_{1,2} N}, \quad (9)$$

получим:

$$n_{1,2}(z) = n_{1,2}^0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1-m}{2}} \frac{K_v(\eta_1)}{K_v(\eta_1^0)} + \frac{q_R + q_{P_0}^0}{\beta_{1,2} N} \left[ 1 - \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1-m}{2}} \frac{K_v(\eta_1)}{K_v(\eta_1^0)} \right] - \frac{q_{P_0}^0 \gamma}{\beta_{1,2} N - \frac{1}{\tau_{P_0}}} \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1-m}{2}} \left[ \frac{K_v(\eta_1)}{K_v(\eta_1^0)} - \frac{K_v(\eta)}{K_v(\eta_0)} \right], \quad (10)$$

$$q_R = \frac{Q_R E_R}{\tau_R w_{\text{ион}}}, \quad q_{P_0}^0 = \frac{Q_R E_{P_0}}{\tau_R w_{\text{ион}}},$$

где

$$\eta_1 = \frac{2}{2-m} \sqrt{\frac{1}{\tau_1 D_m}} z^{\frac{2-m}{2}}, \quad \tau_1 = \frac{1}{\beta_{1,2} N}.$$

Выражения для высотного распределения концентрации легких ионов под влиянием ионизации, обусловленной распадом радона и полония, при разных стратификациях имеют следующий вид:

при  $m = 0$

$$n_{1,2}(z) = n_{1,2}^0 e^{-\sqrt{\frac{1}{\tau_1 D_0}}(z-z_0)} + \frac{q_R + q_{P_0}^0}{\beta N} \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{1}{\tau_1 D_0}}(z-z_0)} \right) - \frac{\gamma q_{P_0}^0}{\beta N - \frac{1}{\tau_{P_0}}} \left( e^{-\sqrt{\frac{1}{\tau_1 D_0}}(z-z_0)} - e^{-\sqrt{\frac{1}{\tau_{P_0} D_0}}(z-z_0)} \right);$$

при  $m = 1$

$$n_{1,2}(z) = n_{1,2}^0 \frac{K_0(\eta_1)}{K_0(\eta_1^0)} + \frac{q_R + q_{Po}^0}{\beta N} \left( 1 - \frac{K_0(\eta_1)}{K_0(\eta_1^0)} \right) - \frac{\gamma q_{Po}^0}{\beta N - \frac{1}{\tau_{Po}}} \left( \frac{K_0(\eta_1)}{K_0(\eta_1^0)} - \frac{K_0(\eta')}{K_0(\eta_0')} \right); \quad (11)$$

при  $m = 4/3$

$$n_{1,2}(z) = n_{1,2}^0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-\frac{1}{3}} e^{-\sqrt[3]{\frac{1}{\tau_1 D_{4/3}} \left( \frac{1}{z^3} - \frac{1}{z_0^3} \right)}} + \frac{q_R + q_{Po}^0}{\beta N} \left( 1 - \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-\frac{1}{3}} e^{-\sqrt[3]{\frac{1}{\tau_1 D_{4/3}} \left( \frac{1}{z^3} - \frac{1}{z_0^3} \right)}} \right) - \frac{\gamma q_{Po}^0}{\beta N - \frac{1}{\tau_{Po}}} \left( \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-\frac{1}{3}} e^{-\sqrt[3]{\frac{1}{\tau_1 D_{4/3}} \left( \frac{1}{z^3} - \frac{1}{z_0^3} \right)}} - \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-\frac{1}{3}} e^{-\sqrt[3]{\frac{1}{\tau_{Po} D_{4/3}} \left( \frac{1}{z^3} - \frac{1}{z_0^3} \right)}} \right).$$

Пример графического представления распределения концентрации легких ионов, сформировавшегося под влиянием повышенных концентраций радиоактивных веществ, при разных стратификациях приземного слоя атмосферы приведен на рис. 2. Значения параметров, используемых при расчетах, приведены в табл. 2.

Найденные значения  $n_1$  и  $n_2$  дают возможность найти распределение с высотой электрической проводимости  $\lambda(z)$ :

$$\lambda(z) = e b_1 n_1 + e |b_2| n_2, \quad (12)$$

где  $e$  — электрический заряд электрона,  $b_1$  и  $b_2$  — подвижность легких ионов.

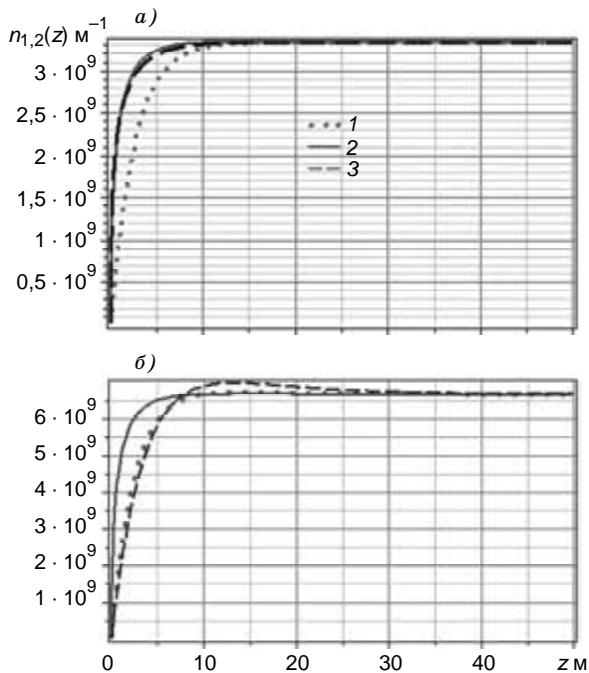


Рис 2. Вертикальное распределение концентрации легких ионов  $n_{1,2}(z)$  в приземном слое атмосферы, обусловленное повышенной концентрацией радионуклидов:  $^{85}\text{Kr}$  (а) и  $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$  (б).

1 — устойчивая стратификация, 2 — нейтральная, 3 — неустойчивая.

Таблица 2

**Значения различных параметров, используемых при расчете вертикального распределения легких ионов**

$$\begin{array}{l}
 D_0 = 0,2 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\
 D_1 = 0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \\
 D_{4/3} = 0,32 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 q_{\text{Rn+Po}}^0 = 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1} \\
 q_{\text{Kr}}^0 = 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1} \\
 n_{1,2}^0 = 10^7 \text{ м}^{-3}
 \end{array} \right.
 \left| \begin{array}{l}
 \gamma = 0,2 \\
 N = 10^{10} \text{ м}^{-3} \\
 \beta = 3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}
 \end{array} \right.$$

Распределение с высотой электрической проводимости соответствует распределению концентрации легких ионов, представленному на рис. 2.

Рассмотрим численные значения концентрации радиоактивных веществ, которые использовались при проведении численных расчетов. Предполагалось, что их концентрация такова, что интенсивность ионообразования, создаваемая ими, превосходит интенсивность ионообразования, создаваемую галактическими космическими лучами и естественными радиоактивными веществами, эманация которых, происходящая с земной поверхности, составляет  $10^7 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Найдем связь между радиоактивностью, создаваемой различными радиоактивными веществами, и их концентрацией. Радиоактивность криптона  $C_{\text{Кр}}$  связана с концентрацией криптона соотношением:  $C_{\text{Кр}} (\text{Ки}/\text{м}^3) = 8 \cdot 10^{-20} Q_{\text{кр}} (\text{м}^{-3})$ . Тогда, если  $C_{\text{Кр}} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ Ки}/\text{м}^3$ , то  $Q_{\text{кр}} = 10^{13} \text{ м}^{-3}$ , а если  $C_{\text{Кр}} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ Ки}/\text{м}^3$ , то  $Q_{\text{кр}} = 10^{14} \text{ м}^{-3}$ . В этом случае в соответствии с формулой (10) получим следующее максимальное значение интенсивности ионообразования, создаваемой криптоном-85:  $q_{\text{Кр}} = 2,5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $2,5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для суммарного действия радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) и полония ( $^{218}\text{Po}$ ) получим следующее максимальное значение интенсивности ионообразования:

$$q_{\text{max}} = \frac{2Q_{\text{R}}E(6 \text{ МэВ})}{\tau_{\text{R}}w_{\text{ион}}(32,5 \text{ МэВ})} = 1,11Q_{\text{R}}.$$

Если  $Q_{\text{R}} = 10^9 \text{ м}^{-3}$ , то  $q_{\text{max}} = 1,11 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . В единицах радиоактивности это составит  $C_{\text{R}} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ки}/\text{м}^3$ .

Оценим концентрацию аэрозольных частиц при выполнении условия  $\beta N n_{1,2} \gg \alpha n_{1,2}^2$ . Из этого условия следует, что

$$N \gg \frac{\alpha}{\beta} n_{1,2} \approx n_{1,2}, \text{ так как } \alpha \approx \beta \text{ (здесь предполагается, что } \beta_1 = \beta_2 = \beta).$$

Допуская, что  $n_{1,2} = \frac{q}{\beta N}$ , получаем, что  $N \gg \sqrt{\frac{q}{\beta}} = 7,9 \cdot 10^5 \sqrt{q}$  при  $\beta = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ . Для  $q = 1,11 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$  и  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$  имеем  $n_{1,2} = 6,9 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$  и для  $N = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$  имеем  $n_{1,2} = 1,56 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ .

Используя результаты численных расчетов электрической проводимости в приземном слое, обусловленной радиоактивными веществами, можно рассмотреть задачу о распределении напряженности электрического поля с высотой.

В условиях сильного турбулентного перемешивания уравнение для напряженности электрического поля в приземном слое имеет следующий вид:

$$-D_m z^m \frac{d^2 E_z}{dz^2} + 4\pi\lambda(z)E_z = 4\pi j_0, \quad (13)$$

где  $j_0$  — плотность вертикального электрического тока в атмосфере;  $E_z$  — составляющая напряженности электрического поля, направленная вертикально.

Граничные условия для решения уравнения (13) имеют следующий вид (Куповых и др., 1998):

$$\frac{dE_z}{dz}(z = z_0) = 0, \quad E_z(z \rightarrow \infty) = \frac{j_0}{\lambda(\infty)}. \quad (14)$$

Это условие соответствует предположению, что  $n_{1,2}^0 = 0$ .

При  $n_{1,2}^0 \neq 0$  для расчетов напряженности электрического поля в приземном слое можно использовать соотношение, которое следует из выражения (13), если пренебречь диффузионным членом:

$$E_z(z) = \frac{j_0}{\lambda(z)}. \quad (15)$$

Примеры графического представления полного решения уравнения (13) с помощью численных методов на основе расчетов с использованием данных табл. 3 приведены на рис. 3 и 4. Для получения решения были использованы граничные условия (14). На рис. 5 представлено решение без учета турбулентной диффузии.

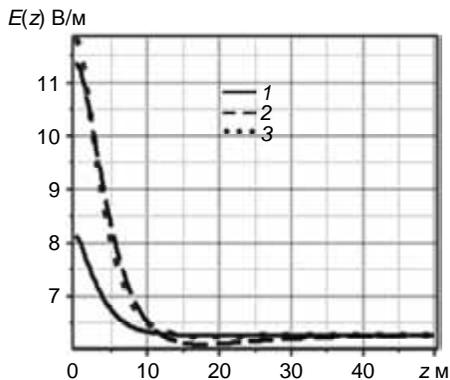


Рис. 3. Вертикальное распределение напряженности электрического поля для радона-222 + полония-218 при разной стратификации приземного слоя.

1 — нейтральная стратификация ( $D_1 = 0,2$  м/с), 2 — неустойчивая ( $D_{4/3} = 0,15$  м<sup>2/3</sup>/с), 3 — устойчивая ( $D_0 = 0,2$  м<sup>2</sup>/с).

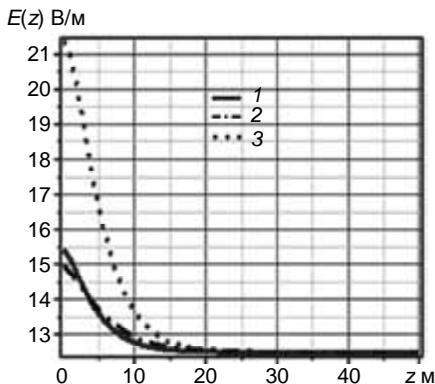


Рис. 4. Вертикальное распределение напряженности электрического поля для криптона-85 при разной стратификации приземного слоя.

1 — нейтральная стратификация ( $D_1 = 0,2$  м/с), 2 — неустойчивая ( $D_{4/3} = 0,15$  м<sup>2/3</sup>/с), 3 — устойчивая ( $D_0 = 0,2$  м<sup>2</sup>/с).

**Значения параметров, используемых при расчете вертикального  
распределения напряженности электрического поля**

$D_0 = 0,2 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	$n_{1,2}^0 = 10^7 \text{ м}^{-3}$
$D_1 = 0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$q_\infty = 10^7 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$	$n_{\text{max}} = 8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$
$D_{4/3} = 0,32 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$		$E_\infty = 100 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$

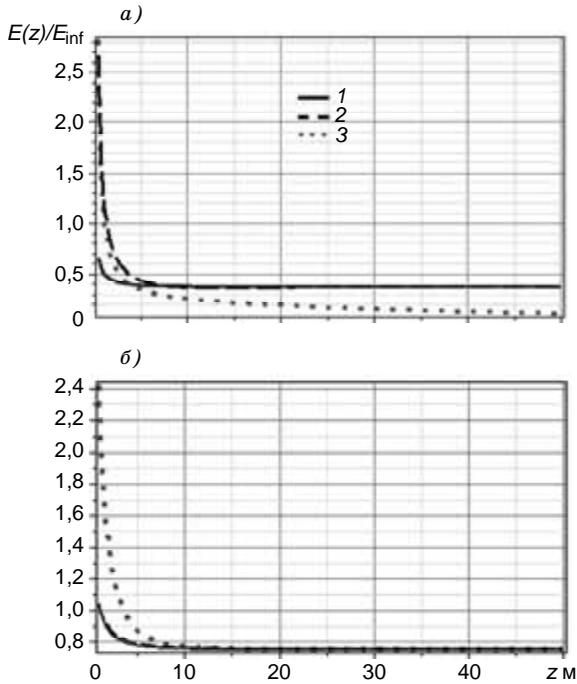


Рис. 5. Вертикальное распределение напряженности электрического поля без учета турбулентной диффузии, обусловленное  $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$  (а) и  $^{85}\text{Kr}$  (б).  
1 — устойчивая стратификация, 2 — нейтральная, 3 — неустойчивая.

## 2. Обсуждение полученных результатов

В настоящей работе предпринята попытка построения математической модели влияния радиоактивных веществ на электрическую структуру приземного слоя атмосферы. Полученная модель учитывает радионуклиды как с большими периодами полураспада ( $\tau_{Kr} = 10,8$  лет), так и с относительно маленькими ( $\tau_R = 3,8$  сут и  $\tau_{Po} = 180$  с).

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Развита теоретическая модель, связывающая концентрацию радиоактивных веществ в приземном слое атмосферы с концентрацией легких ионов, электрической проводимостью и напряженностью электрического поля. Модель построена на предположении, что интенсивность ионообразования, создаваемая этими веществами, превосходит фоновую интенсивность ионообразования, создаваемую галактическими космическими лучами.

Увеличение электрической проводимости за счет этих факторов приводит к уменьшению напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работах Dyachuk et al. (1992) и Israelson, Knudsen (1986). Таким образом, построенная теоретическая модель позволяет использовать данные по измерению электрической проводимости и напряженности электрического поля атмосферы для оценки концентрации радиоактивных субстанций.

*Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг. (государственный контракт № П781 от 24 мая 2010 г.) по направлению «Физика атмосферы».*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зилитинкевич С. С. (1970). Динамика пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 290 с.

Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. (1998). Теория электродного эффекта в атмосфере. — Таганрог: Изд-во ТРТУ. 122 с.

*Ламли Дж. Л., Пановский Г. А. (1966).* Структура атмосферной турбулентности. — М.: Мир. 264 с.

*Монин А. С., Обухов А. Н. (1954).* Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды Геофизического института АН СССР. № 34(151). С. 163—187.

*Морозов В. Н. (2011).* Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. — СПб: Изд-во РГГМУ. 252 с.

*Орленко Л. П. (1979).* Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат. 270 с.

*Boeck L. W. (1975).* Meteorological consequences of atmospheric krypton-85 // Science. V. 193, No. 4249. P. 195—198.

*Dyachuk V. A., Martynov A. A., Sterchov P. L., Shvarts Ya. M. (1992).* The changes of electrical state of the atmospheric boundary layer under the influence of inadvertent anthropogenic impact: radioactivity impurity ejection and chimney plumes / Proc. 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, June 15—19, 1992, St. Petersburg, Russia. V. I. P. 50—53.

*Israelson S., Knudsen E. (1986).* Effect of radioactive fallout from nuclear power plant accident on electrical parameters // J. Geophys. Res. V. 91. No. D11. P. 11909—11910.

*Yordanov D. (1968).* On the stationary vertical distribution of a weightless radioactive substance in the surface air layer // Arch. Met. Geophys. Biokl. Ser. A. V. 17, No. 2—3. P. 246—250.

*Willett J. (1985).* Atmospheric — electrical implications of <sup>222</sup>Rn daughter depositions on vegetated ground // J. Geophys. Res. V. 90, No. D4. P. 5901—5908.

## ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЯ

*Л. С. Ивлев<sup>1</sup>, Ю. А. Довгалюк<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
198504 Санкт-Петербург, Петергоф, Ульяновская ул., 1  
E-mail: ivlev.lev@mail.ru

<sup>2</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: dovgaluk35@mail.ru, dovgaluk@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 5.09.2012  
Поступила после доработки 31.10.2012

Одной из важнейших задач физики аэрозолей, атмосферного электричества и атмосферной оптики является изучение влияния влажности на электрические и структурные характеристики аэрозоля. Общеизвестно, что изменчивость большинства метеорологических, электрических, оптических и других характеристик атмосферы обусловлена суточными и сезонными вариациями солнечной радиации, и это объясняет высокую корреляционную связь между различными, часто независимыми атмосферными параметрами.

Известное соотношение Имянитова—Шифрина  $E = cS_m^{-1}$  (где  $E$  — напряженность электрического поля,  $S_m$  — горизонтальная дальность видимости,  $c$  — константа) получено в предположении, что вариации метеорологической дальности видимости  $S_m$  обусловлены изменением концентрации частиц, рассеивающих свет, — вероятно, ядер конденсации. Границы применимости соотношения Имянитова—Шифрина исследовались в ряде работ.

На рис. 1 представлена зависимость между коэффициентом аэрозольного ослабления ( $\alpha$ ) и напряженностью электрического поля ( $E$ ), полученная по результатам натуральных измерений (для  $\alpha$  от 0,05 до 0,12 км<sup>-1</sup> при  $E$  от 100 до 200 В/м) и результатам лабо-

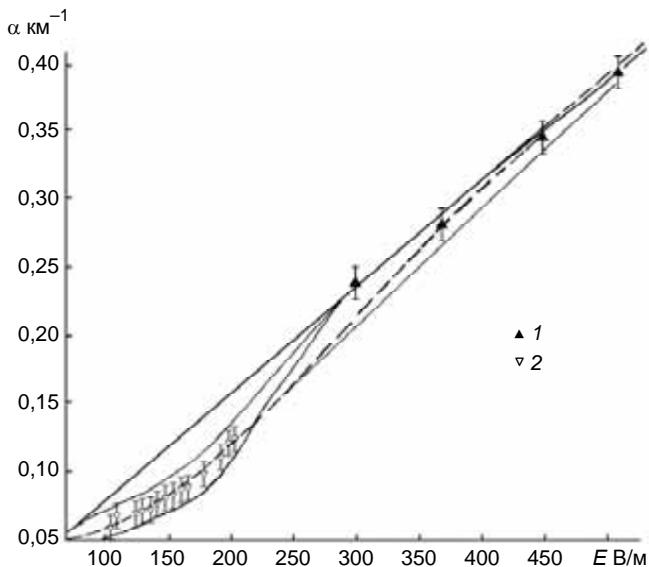


Рис. 1. Зависимость коэффициента аэрозольного ослабления ( $\alpha$ ) от напряженности электрического поля ( $E$ ).

1 — данные измерений в камере туманов ГГО, 2 — данные натуральных измерений в Томске.

раторных измерений в большой камере туманов ГГО (для  $\alpha$  от 0,05 до 0,40 км<sup>-1</sup> при  $E$  от 300 до 500 В/м) (Ивлев, 2001).

На рис. 2 представлен суточный ход коэффициента аэрозольного ослабления ( $\alpha$ ), относительной влажности ( $f$ ) и напряженности электрического поля ( $E$ ) в приземном слое атмосферы в осенний период в районе г. Томска (Пхалагов, Донченко, Овчаренко и др., 1999). В утренние и дневные часы наблюдается хорошая корреляция  $\alpha$  и  $f$ , а в вечерние —  $E$  и  $f$ .

С увеличением относительной влажности происходит перестройка спектра ионов по подвижности и уменьшается электропроводность воздуха (Савченко, Смирнов, 1973). При наличии капель воды электропроводность воздуха резко уменьшается за счет интенсивного поглощения ими ионов (Гирс, Шишкин, 1970). При этом в обоих случаях, как правило, происходит более

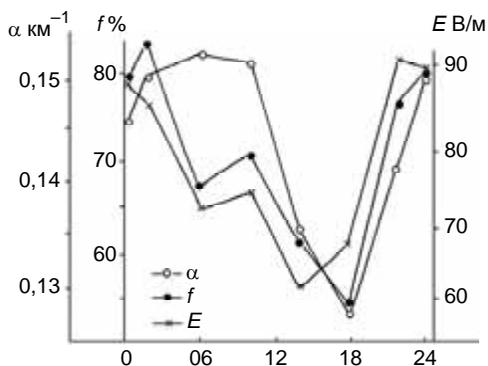


Рис. 2. Суточный ход коэффициента аэрозольного ослабления ( $\alpha$ ), относительной влажности ( $f$ ) и напряженности электрического поля ( $E$ ) в приземном слое по данным измерений в Томске.

заметное уменьшение отрицательной проводимости по сравнению с положительной.

На рис. 3 представлен суточный ход объемного заряда  $\rho$ , тока проводимости  $i_{\text{пр}}$  и концентрации нанометровых частиц  $N_{\text{нм}}$  в летний и зимний периоды в приземном слое атмосферы (Horrak, Salm, Tammet, 2001). Из рисунка видно, что объемный заряд содержится в основном в нанометровых аэрозольных частицах.

Избирательность поверхности частиц к захвату ионов наиболее определенно проявляется у капель воды, которые адсорбируют отрицательные ионы эффективнее, чем положительные. Избирательность захвата легких отрицательных ионов поверхностным слоем молекул воды, возможно, с фуллереновой организацией структуры, обуславливает увеличение униполярности  $\lambda_+/\lambda_- = (n_+/n_-)$  от 1,2 до 3 при увеличении относительной влажности от 50 до 90 % (Ивлев, 2001; Резников, 2011).

Натурные измерения электрической проводимости воздуха ( $\lambda$ ) в приземном слое атмосферы свидетельствуют о том, что даже в слабо запыленной атмосфере наблюдаются изменения проводи-

мости в 1,5—3 раза, а при пыльных бурях проводимость может изменяться на порядок. В качестве примера на рис. 4 приведен суточный ход электрической проводимости воздуха для разных сезонов в Италии (Paoletti et al., 1989).

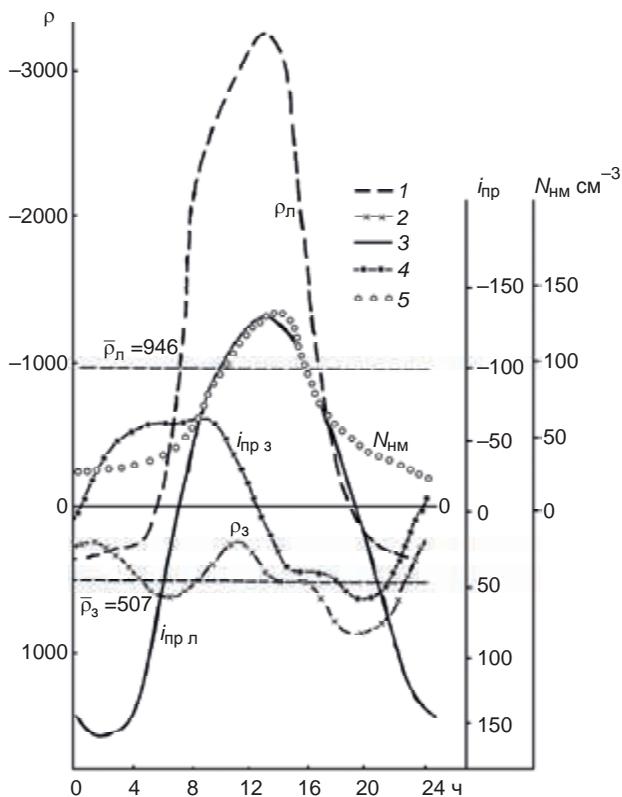


Рис. 3. Суточный ход объемного заряда ( $\rho$ ), тока проводимости ( $i_{\text{пр}}$ ) и концентрации нанометровых частиц ( $N_{\text{нм}}$ ) в летний и зимний периоды в приземном слое атмосферы.

1 и 2 — плотность объемного заряда летом (1) и зимой (2);  
3 и 4 — ток проводимости летом (3) и зимой (4); 5 —  
счетная концентрация ( $N_{\text{нм}}$ ) нанометровых частиц.

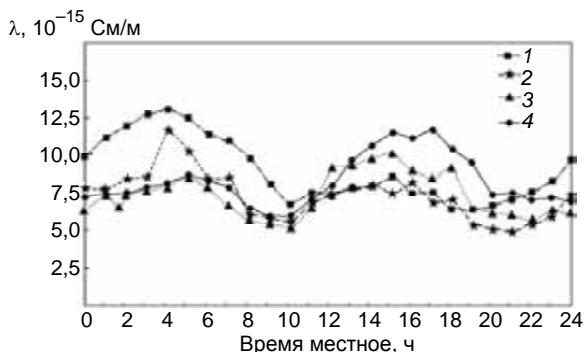


Рис. 4. Суточный ход электрической проводимости приземного слоя воздуха ( $\lambda$ ) для разных сезонов года.

1 — осень, 2 — зима, 3 — весна, 4 — лето.

Экспериментально установлено, что увеличение относительной влажности от 20 до 60—70 % приводит к увеличению в приземном слое атмосферы концентрации больших аэрозольных частиц размером  $r \geq 0,2$  мкм (Ивлев, Довгальук, 1976; Ивлев, 2001; Резников, 2011). В то же время, крупные аэрозольные частицы при этом практически не увеличиваются (Ивлев, Довгальук, 1976; Ивлев, 2001). Можно предположить, что при возрастании относительной влажности происходит ускорение коагуляционного роста частиц. Эту гипотезу подтверждает тот факт, что распределение по размерам частиц аэрозоля радиусом 0,1 мкм описывается формулой Юнге, так как само существование распределения Юнге по размерам обусловлено, по-видимому, постоянным действием коагуляционного механизма (Юнге, 1965).

Таким образом, накопленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что изменение относительной влажности приводит к одновременному изменению как структурных, так и электрических характеристик атмосферного аэрозоля. Комплексные исследования изменения структурных и электрических характеристик аэрозоля при изменении относительной влажности от 30 до 90 % в контролируемых и управляемых условиях были проведены в большой камере туманов ГГО. В процессе экс-

периментов определялись интегральная и спектральная концентрация аэрозоля, его морфологический состав и полярные электропроводности воздуха.

*Аппаратура и методика измерений.* Для проведения исследований был использован следующий комплекс аппаратуры: экспериментальный образец прибора для измерения электропроводности воздуха, разработанный Я. М. Шварцем и предназначенный для измерения полярной проводимости воздуха в диапазоне  $(0...30) \cdot 10^{-15}$  См/м. Прибор состоит из аспирационного конденсатора, измерителя тока конденсатора и регистрирующего устройства. Скорость протяжки воздуха в приборе составляет 2,5 м/с, инерционность — около 10 с (Ивлев, Довгалюк, 1976).

Для измерения интегральной площади аэрозольных частиц применялся электроиндукционный пылемер ЭИП-4 конструкции Ленинградского института авиационного приборостроения. Прибор измеряет суммарный заряд аэрозольных частиц радиусом  $r \geq 0,5$  мкм, прошедших за единицу времени через входное устройство прибора, в котором частицы приобретают заряд, пропорциональный площади частиц.

Аэрозольные пробы брались на полихлорвиниловые фильтры ФПП-15 заборником проб аэрозоля (Ивлев, 2006) с последующей обработкой для морфологического и дисперсионного анализа на электронном микроскопе. Температура и влажность фиксировались стандартными психрометром и гигрометром.

*Методика проведения экспериментов.* Для выяснения связи между электрическими и структурными характеристиками аэрозоля в замкнутом объеме были проведены:

фоновые опыты при относительной влажности  $f = 30$  %;

опыты в увлажненной камере при двух способах увлажнения: 1) увлажнении внутренней поверхности камеры, 2) путем испарения подогретой воды.

Перед началом увлажнения воздуха выполнялись фоновые измерения его температуры, влажности и электропроводности, а также структуры аэрозоля.

В каждом из опытов с использованием первого способа увлажнения удавалось провести комплексные измерения всех характе-

ристик только при одном значении влажности. При втором способе увлажнения воздуха измерения в каждом опыте проводились при относительной влажности от 30 до 90 % через каждые 10 %.

Все приборы были установлены на уровне 1,5—2,0 м от пола камеры. Аэрозольные измерения проводились на двух уровнях (2 и 6 м).

Во время экспериментов в камере без увлажнения обычно поддерживалась температура около 22 °С и относительная влажность примерно 30 %.

Положительная электропроводность в камере составляла  $(3,5...5,5) \cdot 10^{-15}$  См/м, отрицательная  $(3,3...5,0) \cdot 10^{-15}$  См/м, что на порядок ниже средних значений электропроводности в атмосфере (Гирс, Шишкин, 1970).

*Результаты экспериментов.* Характерные спектры аэрозольных частиц и результаты морфологического анализа проб представлены в табл. 1 и 2 (Ивлев, Довгалюк, 1976).

Исследования структуры аэрозоля показали четко выраженное изменение ее с высотой. Примеры типичных распределений аэрозольных частиц по размерам в камере приведены в табл. 1 (пробы 1—4). Наблюдается заметное отклонение от юнговского распределения для гигантских частиц. Морфологический анализ проб показал, что характерно наличие относительно большого числа рыхлых частиц как правильной сферической, так и неправильной формы (табл. 2, пробы 1—4).

Таких частиц рыхлых коагулянтов в пробах было от 55 до 65 % по счетной концентрации для всего исследуемого диапазона размеров частиц (от 0,05 до 5 мкм).

При первом способе увлажнения в результате баллоэлектрических эффектов абсолютные значения полярной проводимости очень резко изменялись от опыта к опыту.

Снимки аэрозольных проб с помощью электронного микроскопа показали наличие в пробах частиц, которые можно было трактовать как высохшие капельки. Исследования морфологии частиц (см. табл. 2, пробы 5 и 6) показали, что по сравнению со случаем увлажнения камеры увеличивается доля рыхлых сферических частиц и уменьшается доля частиц неправильной формы и цепочек.

Таблица 1

## Спектр аэрозольных частиц в камере ГГО

Номер пробы	Средний диаметр, мкм							Диапазон размеров							Концентрация частиц
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6— 0,8	0,8— 1,0	1,0— 1,5	1,5— 2,0	2,0— 2,5	2,5— 3,0	> 3,0		
1	12,5	60,0	32,0	20,5	7,0	12,5	15,5	9,5	18,0	3,0	2,0	3,5	1,0	197,0	
2	6,0	45,5	61,1	39,0	25,0	14,0	10,5	7,5	6,0	1,0	0,30	—	—	215,9	
3	17,5	56,0	71,6	45,6	36,0	23,0	22,3	10,0	3,5	1,5	0,40	0,5	0,60	288,0	
4	114,5	81,0	75,0	23,6	13,0	9,0	14,0	1,6	2,8	1,8	0,20	0,15	0,10	336,6	
5	33,6	45,6	49,5	31,8	18,0	14,0	9,0	1,8	0,6	0,6	0,15	0,10	0,50	205,2	
6	48,0	179,	149,	51,0	14,4	7,2	11,2	2,1	0,6	0,4	0,27	0,20	0,16	463,3	
7	18,4	66,0	69,2	38,0	25,6	10,8	20,8	8,8	8,4	1,2	0,21	0,21	0,10	267,7	
8	0,8	62,4	55,6	21,6	18,0	26,4	11,0	3,6	12,8	4,0	0,80	0,20	1,00	218,2	

Таблица 2

## Результаты морфологического анализа аэрозольных проб, взятых в камере туманов ГГО

Номер пробы	Дата	Время	Высота, м	f %	Содержание частиц разных форм, %							
					Сферические				Рыхлые	Неправильные рыхлые	«Цепочка»	
					Плотные	Неправильные плотные	Плотные с «шубой»	С «ободком»				С «высохшей каплей»
1	25.01	15.45	2,0	23,0	14,9	14,5	11,2	0,25	2,05	28,6	14,0	14,5
2	25.01	15.45	6,0	23,0	20,4	13,4	1,9	4,2	3,3	17,6	11,6	27,6
3	28.01	09.00	2,0	23,0	18,5	16,5	0,5	5,5	6,0	32,1	7,6	13,3
4	28.01	09.20	6,0	23,0	63,1	9,5	—	4	0,4	15,0	—	8,0
5	04.02	10.55	2,0	23,0	23,6	16,2	—	0,4	7,9	37,7	—	14,2
6	04.02	13.45	2,0	61—63	22,6	5,1	—	1,9	0,7	65,7	—	4,0
7	25.02	11.30	2,0	30,0	21,6	18,5	—	2,2	3,5	20,9	10,1	23,2
8	25.02	15.50	2,0	61,0	37,7	21,7	3,7	—	—	14,2	2,3	20,4

Из табл. 1 (пробы 5 и 6) следует, что наблюдается заметный рост концентрации частиц диаметром  $d \leq 0,4$  мкм, уменьшение концентрации частиц диаметром  $0,4—0,6$  мкм и примерное постоянство концентрации частиц диаметром более  $0,6$  мкм. Концентрация крупных частиц диаметром более  $3$  мкм уменьшается.

Полученные результаты, по-видимому, обусловлены особенностями увлажнения камеры. Так, увеличение мелкодисперсной фракции (мкм), скорее всего, связано с разбрызгиванием и высыханием капель воды, а уменьшение концентрации частиц диаметром более  $3$  мкм — с вымыванием этих частиц.

На рис. 5 показано изменение полярной проводимости  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$ , коэффициента униполярности  $\lambda_+/\lambda_-$  и интегральной концентрации аэрозольных частиц в зависимости от относительной влажности. В первом опыте как  $\lambda_+$ , так и  $\lambda_-$  уменьшаются с увеличением относительной влажности до  $60\%$ . Однако, как показывает коэффициент униполярности  $\lambda_+/\lambda_-$ , отрицательная проводимость уменьшается гораздо сильнее, чем положительная. Затем до значения  $f = 80\%$  наблюдается незначительное увеличение проводимости — как  $\lambda_+$ , так и  $\lambda_-$ . Ход  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$  хорошо коррелирует с ходом интегральной концентрации аэрозоля, которая имеет максимум при относительной влажности  $60\%$ , а затем уменьшается.

Во втором опыте интегральная концентрация аэрозольных частиц практически не меняется, величины  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$ , так же как и отношение  $\lambda_+/\lambda_-$  изменяются незначительно, причем коэффициент униполярности  $\lambda_+/\lambda_-$  имеет обратный ход, т. е.  $\lambda_+$  уменьшается сильнее, чем  $\lambda_-$ . Следовательно, в рассматриваемых экспериментах уменьшение величин полярной проводимости происходило в основном за счет осаждения ионов на аэрозольных частицах, и влияние на проводимость эффекта перестройки спектра ионов по подвижности незначительно.

Структурные измерения показали, что наблюдается переход мелкодисперсной фракции аэрозоля ( $d < 0,5$  мкм) во фракцию аэрозоля диаметром  $d \geq 0,5$  мкм (см. табл. 1, пробы 7 и 8). При этом, поскольку в начальном состоянии наблюдалось заметное отклонение от юнговского распределения и счетная концентрация частиц была заметно ниже, чем в чистой атмосфере, размер частиц увели-

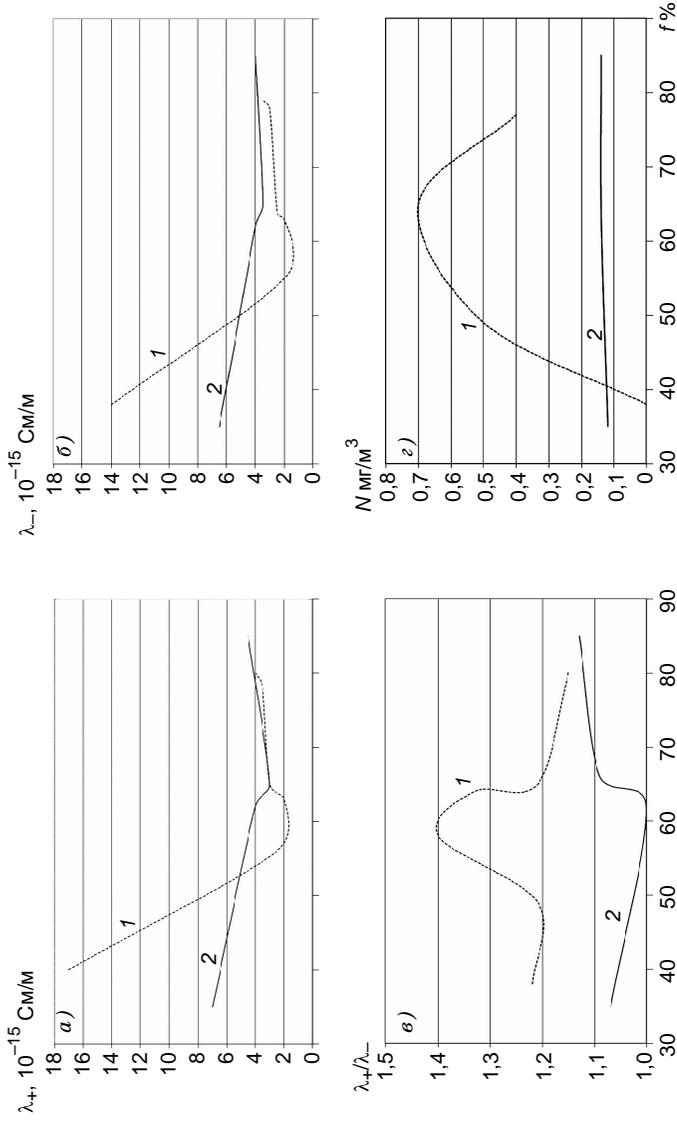


Рис. 5. Изменение полярной проводимости воздуха  $\lambda_+$  (а) и  $\lambda_-$  (б), коэффициента униполярности  $\lambda_+/\lambda_-$  (в), интегральной концентрации аэрозольных частиц  $N$  с увеличением относительной влажности в опытах 1 и 2.

чивался в довольно широком диапазоне. Эти результаты можно объяснить только с точки зрения коагуляционной гипотезы.

Морфологический анализ показал, что наблюдается значительное увеличение доли частиц, имеющих плотную сферическую форму с «шубой», но уменьшаются число плотных частиц неправильной формы и «цепочек», а также число рыхлых частиц неправильной формы. Вероятно, это связано со стягиванием рыхлых частиц за счет поверхностного натяжения воды, сконденсировавшейся в микрокапиллярных отверстиях на поверхности частиц.

Формирование частиц с «шубой» из более мелких частиц и исчезновение частиц с ободком и с «высохшей оболочкой» также говорят в пользу объяснения эффекта изменения структуры частиц увеличением эффективности коагуляции аэрозольных частиц при увеличении влажности (Лушников, Смирнов, 1975).

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что увеличение относительной влажности от 30 до 60—70 % приводит к уменьшению величин полярной проводимости воздуха и увеличению интегральной поверхности частиц; при больших значениях влажности наблюдается увеличение полярной проводимости и уменьшение интегральной поверхности аэрозоля. Указанный характер изменения поверхности аэрозоля подтверждает предположение о том, что наличие заряда на аэрозольных частицах облегчает адсорбцию водяного пара, в результате чего наблюдается увеличение интегральной поверхности аэрозоля. Последующее убывание поверхности при большой влажности связано, по-видимому, с коагуляцией увлажненных частиц и их уплотнением.

Результаты комплексных экспериментов позволяют выявить основные процессы, определяющие закономерности изменения электрических и структурных характеристик аэрозоля. Однако проведение этих исследований требует применения большого комплекса аппаратуры, что делает эти опыты очень трудоемкими. Для получения надежных и репрезентативных результатов нужны тщательно отработанная методика их проведения и дополнительные опыты.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, грант 10-05-00859а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Гирс С. П., Шишкин Н. С.* (1970). Об электрических свойствах мелкокапельных конвективных облаков // Труды ГГО. Вып. 253.

*Ивлев Л. С.* (2006). Начала физики погодообразования и климата. Часть 1. Том 2. Влияние аэродисперсных систем на динамические и другие климатообразующие процессы в атмосфере. — СПб.

*Ивлев Л. С.* (2001). О взаимосвязи электрических и метеорологических характеристик атмосферы / В сб.: Труды III Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли», СПб, 24—27 сентября 2001 г. — СПб, с. 279—288.

*Гирс С. П., Довгалюк Ю. А., Ивлев Л. С., Махалов Ю. А., Одинцов О. А., Соломатин В. К., Страхов В. А.* (1976). О влиянии изменения относительной влажности на электрические и структурные характеристики аэрозоля // Труды ГГО. Вып. 372. С. 46—54.

*Ивлев Л. С., Ионин В. А., Семова А. Ю.* (1973). Вымывание аэрозоля в приземном слое атмосферы // Труды ГГО. Вып. 293. С. 161—172.

*Лушников А. А., Смирнов В. И.* (1975). Стационарная коагуляция и распределения частиц атмосферных аэрозолей по размерам // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 11, № 2. С. 139—151.

*Пхалагов Ю. А., Донченко В. А., Овчаренко Е. В.* и др. (1999). Исследование корреляционных связей аэрозольного ослабления оптического излучения с напряженностью электрического поля // Оптика атмосферы и океана. Т. 12, № 2. С. 122—132.

*Резников В. А.* (2011). Гидратация фуллеренов как модель конденсации воды на частицах / В сб.: Труды III Международной конференции «Экология и космос», СПб, 30 мая—1 июня 2011 г. — СПб, с. 255—274.

*Савченко А. В., Смирнов В. В.* (1973). Исследование кинетики электризации облачной среды путем моделирования процесса в большой аэрозольной камере // Труды ИЭМ. Вып. 4 (38). С. 3—28.

*Юнге Х.* (1965). Химический состав и радиоактивность атмосферы. — М.: Мир. 140 с.

*Horrak U., Salm J., Tammet H.* (2001). Diurnal variation of charged atmospheric aerosols in nucleation and Aitken mode ranges // J. Aerosol Sci. V. 32, Suppl. 1. P. 169—170.

*Paoletti D., Schiripa Spagnolo G.* (1989). Atmospheric electricity in a rural site and its possible correlation with pollution: a preliminary study // Atmos. Environ. V. 23, No. 7. P. 1607—1611.

## МЕТЕОРОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТЕОЗАЩИТЫ МЕГАПОЛИСА

*В. Н. Козлов<sup>1</sup>, В. И. Акселевич<sup>2</sup>, Г. И. Мазуров<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: vladimirn36@mail.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургская академия управления и экономики  
190103 Санкт-Петербург, Лермонтовский пр., 44  
E-mail: vaksster@gmail.com

Поступила в редакцию 13.02.2012  
Поступила после доработки 5.09.2012

### **Введение**

Искусственные воздействия на метеорологические процессы используются в коммунальном хозяйстве городов для активного изменения неблагоприятного состояния природной среды с целью снижения ее отрицательного воздействия на производственную деятельность. Результаты создания благоприятных погодных условий оцениваются полученным экономическим и экологическим эффектом. Экономическая эффективность искусственных воздействий при метеозащите мегаполисов определяется не всегда, так как влияние изменений погодных условий на производственно-хозяйственную деятельность потребителей в большинстве случаев количественно неизмеримо или отсутствуют необходимые для расчетов исходные данные, или не разработаны адекватные экономико-математические модели оценки экономического эффекта и затрат на его достижение.

Научно обоснованная оценка потенциальной экономической эффективности метеозащиты городских территорий от выпадения ливневых зимних осадков является одним из основных компонентов принятия решения о проведении искусственных воз-

действий, так как уборка снега с улиц города является длительным и дорогостоящим мероприятием.

В настоящей работе рассмотрены основы экономической эффективности метеозащиты, под которой понимается экономическая выгода и окупаемость затрат на применение технологий метеозащиты, позволяющих предотвратить экстремальные снегопады или снизить их интенсивность методами активных воздействий (АВ) на погодные условия. Результирующее влияние погодных условий и действия потребителя при интенсивных снегопадах наглядно оцениваются с помощью некоторых экономических критериев.

## 1. Общие положения

В общем случае *экономический эффект* от АВ по метеозащите характеризует абсолютное значение полученной экономии или предотвращенных потерь материальных и трудовых ресурсов по уборке снега с территории города, финансовых или иных средств за вычетом произведенных затрат для метеозащиты. В отличие от экономического эффекта *экономическая эффективность* применения метеозащиты является относительной величиной (удельный экономический эффект) и характеризует отношение достигнутого экономического эффекта к стоимости затрат на его получение.

Экономический эффект от производственной деятельности образуется непосредственно в отраслях экономики, т. е. у потребителей при нормальном функционировании городского хозяйства при стандартных метеоусловиях. При экстремальных снегопадах проводится комплекс мероприятий (вывоз снега, очистка крыш от снега и сосулек, устранение повреждений ЛЭП и др.), требующих определенных затрат, которых можно частично или полностью избежать при осуществлении метеозащиты, — это потенциальный экономический эффект. В суммарные затраты метеозащиты входят затраты на ее организацию, аренду авиационных средств, закупку реагентов, аэродромное диспетчерское обслуживание, гидрометеорологическое, радиолокационное и другие виды обеспечения.

Для каждого мегаполиса (большого города) существует климатическая норма высоты ( $H_n$ ) снежного покрова (Мелешко и

др., 2010) и ее экстремальное значение ( $H_э$ ). Аналогично можно представить, что для каждого снегопада существует некоторое распределение вероятности  $P(H)$  влияния снежного покрова высотой  $H$  на хозяйственную деятельность того или иного предприятия, обеспечивающего жизнедеятельность в городе. Предотвращение (снижение интенсивности) снегопадов означает уменьшение влияния снежного покрова значительной высоты, а экстремальные значения высоты снежного покрова — увеличение его влияния вплоть до полного прекращения деятельности.

Опасность снегопада определяется свойствами того объекта (транспорт, строительство, энергетика, ЛЭП и др.), для которого производится оценка. Уменьшить влияние экстремальных снегопадов можно тремя способами (Имянитов, 1985):

- 1) улучшить характеристики объекта (например, использовать автотранспорт повышенной проходимости и т.п.);
- 2) временно прекратить работы;
- 3) проводить метеозащиту от снегопадов.

Улучшение характеристик объекта означает обеспечение безопасности его эксплуатации при значениях  $H$  больше критических  $H_э$ . Критическая высота снежного покрова, при которой вероятность нарушения нормальной жизнедеятельности велика, для Санкт-Петербурга составляет  $H_э > 10$  см.

Определим возникновение опасного события, когда выполняется условие  $H > H_э$ , т. е. при увеличении фактической высоты снежного покрова выше экстремального значения. Обозначим плотность опасных событий (остановка транспорта, аварии, ДТП и др.) в единицу времени через  $N_T$ . Тогда

$$N_T = \sum_{i=1}^n M_i T_i \int_{N_э}^{\infty} P(H) dH = M \bar{T} \int_{N_э}^{\infty} P(H) dH, \quad (1)$$

где  $T_i$  — продолжительность эксплуатации объекта  $M_i$ ,  $\bar{T}$  — среднее время эксплуатации объектов,  $n$  — число объектов.

Введем понятие плотности аварий на одно опасное событие  $\alpha(H)$  и определим общее число аварий при эксплуатации  $M$  объектов в виде

$$N_{aT} = MT \int_{H_0}^{\infty} \alpha(H)P(H)dH, \quad (2)$$

где  $\alpha(H)$  — функция потерь.

Если предположить, что  $H < H_0$ , то значение  $\alpha(H) \rightarrow 0$ , или, точнее,  $\alpha(H) < \alpha_n$ , где  $\alpha_n$  — максимально допустимое число неизбежных аварий при данном уровне техники и ее использования:

$$\alpha_n \geq \frac{\int_0^{H_0} \alpha(H)P(H)dH}{\int_0^{H_0} P(H)dH}. \quad (3)$$

Функция потерь достаточно мала при всех  $H < H_0$  и при  $H > H_0$  характеризует свойства объекта по отношению к высоте снежного покрова  $H$ .

Таким образом, можно связать число нарушений работы объектов с метеорологическими условиями.

При различных состояниях погоды, оказывающих влияние на эффективность производственно-хозяйственной деятельности потребителя, рекомендуется дифференцированный подход, рассматривающий крайние положения: наихудшее, когда влияние на оцениваемый объект наиболее велико, и наилучшее, наиболее благоприятное состояние. При этом целесообразно выделить среднее состояние, а между средним и крайними состояниями — по одному промежуточному состоянию. В итоге влияние погоды при принятии решений будет оцениваться по пяти состояниям. Каждое состояние погоды при метеозащите будет сопряжено с определенными затратами на его достижение с учетом физической эффективности метеозащиты (например, использовать одно воздушное судно, три, шесть и т. д.) Для большинства задач такого учета состояний погоды вполне достаточно (Вимберг и др., 1985).

## 2. Расчет экономического эффекта при применении метеозащиты

Для оценки влияния экстремальных метеорологических процессов на жизнедеятельность городов используются модели, которые описывают функционирование системы: природная среда— средства изменения гидрометеорологических условий (гидрометеорология)—потребитель (Бедрицкий и др., 2001; Хандожко, 2005). На основании этих моделей разработаны метеоролого-экономические модели (МЭМ), которые позволяют оценить экономический эффект от использования методов управления атмосферными процессами, проведения метеозащиты.

МЭМ предполагает задание следующих элементов:

$\Omega_f = \{F_i, I = 1, m\}$  — множество возможных состояний природной среды, приводящих к экстремальным явлениям;

$\Omega_x = \{X_j, j = 1, n\}$  — множество возможных хозяйственных решений, принимаемых органом управления на основе информации о состоянии природной среды;

$P(F, X) = \{P_{ij}, I = 1, m; j = 1, n\}$  — функция, определяющая выигрыш или потери потребителя при возможных сочетаниях погодных условий и хозяйственных решений;

$\Omega_s = \{S_k, k = 1, t\}$  — множество допустимых стратегий принятия решений в зависимости от метеоусловий;

$W$  — критерий принятия решения (оптимальности) — показатель, который позволяет выбрать оптимальную стратегию;

$C$  — стратегия потребителя — совокупность правил, регламентирующих поведение потребителя в каждой конкретной информационной ситуации.

Функция  $P(F, X)$  задается либо в форме функции полезности  $P^+(F, X)$ , либо в форме функции потерь  $P^-(F, X)$ . Функция  $P^+(F, X)$  выражает экономический выигрыш от реализации принятого решения, функция  $P^-(F, X)$  выражает экономические потери.

Вид функции  $P(F, X)$  зависит от формы задания множеств  $\Omega_f$  и  $\Omega_x$ . При дискретных множествах функция представляется в

виде матрицы  $P = \|U_{ij}\|_{ij=1}^{mn}$ .

При расчетах экономического эффекта метеозащиты определяют потенциальный (предотвращенный ущерб) и фактический экономический эффект (повышение качества хозяйственных решений, увеличение чистого дохода и т. д.).

Потенциальный экономический эффект метеозащиты определяется как разность между затратами на ее проведение и предотвращенными финансовыми и материальными потерями в хозяйственной деятельности (затраты на уборку снега, снижение производственной деятельности и др.).

Для решения альтернативы — убирать снег автотранспортом или прибегнуть к метеорологическим мероприятиям (метеозащите) — проведем сравнительные оценки методов. Потенциальный экономический эффект ( $\mathcal{E}_p$ ) будет описываться формулой

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_n - R_n, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}_n$  — предотвращенные финансовые и материальные потери;  $R_n$  — расходы, связанные с воздействиями на атмосферные процессы. Пусть затраты на уборку снежного покрова заданной высоты (например, 10 см) составляют  $R_y$ . Тогда формула (4) приобретает вид

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_n - R_n - R_y. \quad (5)$$

Экономическая эффективность будет описываться выражением

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = (\mathcal{E}_p - R_y)/R_n. \quad (6)$$

В качестве базового варианта при определении потенциального эффекта метеозащиты применяют вариант действий потребителя, который обеспечивает наилучшие показатели эффективности производства при состоянии природной среды, удобной для практической деятельности. Базовые стратегии могут быть ориентированы на средние многолетние значения метеовеличин (климатическая норма при долгосрочном планировании метеозащиты), фактическое состояние погоды, вероятные (прогностические) состояния погоды, экстремальные погодные условия.

Выбор оптимальной стратегии осуществляется по критерию Байеса, согласно которому, оптимальной является такая стратегия  $C_0$ , при которой достигается максимум (минимум) математического ожидания функции полезности (потерь):

$$W = \max(\min)M_s [P(F, X)], \quad (7)$$

где  $M_s$  — оператор вероятностного осреднения (математическое ожидание функции  $P(F, X)$  по множеству возможных значений  $F$  и  $X$  при заданной стратегии  $S$  потребителя).

Если  $F$  и  $X$  — элементы дискретных множеств, а  $P(F, X) = P^+(F, X)$  — функция полезности, то  $W_s$  представляет собой среднее значение чистого дохода:

$$W_s = \max \Sigma \Sigma P^+(F, X). \quad (8)$$

Если  $P(F, X) = P^-(F, X)$  — функция потерь, то

$$W_s = \min \Sigma \Sigma P^-(F, X) \quad (9)$$

представляет собой средние потери.

В повседневной практике стратегия потребителя предполагает три возможности: пренебрежение прогнозом, доверие прогнозу, перестраховка.

### **3. Определение эффективности использования прогностической информации при метеозащите**

Эффективность метеозащиты зависит от своевременного принятия решения на основе прогностической информации. Поэтому принятие решения на основе современных (как правило, ненадежных) прогнозов погоды обязательно должно базироваться на алгоритмах экономически оптимального использования прогностической информации, учитывающих оправдываемость прогнозов. При этом целесообразно сообщать не сами прогнозы, а полученные на их основе рекомендации по проведению метеозащиты. В качестве базы для сравнения при оценке эффективности ис-

пользования прогнозов можно использовать: идеальный прогноз, инерционный прогноз, климатическую информацию.

Потенциальный экономический эффект от использования прогностической информации определяется как разность между средними предотвращенными финансовыми и материальными потерями по множеству ситуаций и затратами на метеозащиту (Абшаев, Малкарова, 2006). Фактический экономический эффект метеозащиты определяется по данным отчетности о результатах производственно-хозяйственной деятельности потребителя за рассматриваемый период.

Расчет экономического эффекта прогностической информации включает следующие этапы:

- определение элементов матриц потерь потребителя, характеризующих зависимость конечных экономических показателей предприятия, объединения, отрасли от гидрометеорологических условий, т. е. ситуацию «опасное явление—защитные мероприятия»;

- составление матриц сопряженности прогнозов гидрометеорологических величин и их фактического состояния, т. е. матриц совместных повторяемостей прогнозируемых и фактических гидрометеорологических условий;

- расчет экономического эффекта по данным матриц относительно нулевого (базового) варианта и выбор оптимальной стратегии принятия хозяйственного решения по максимуму экономического эффекта;

- учет заблаговременности прогноза.

Элементы матрицы потерь (табл. 1) характеризуют экономические потери (ущерб, убытки), которые несет потребитель при проведении или непроведении защитных мероприятий в зависимости от имеющих место опасных метеоусловий (снегопадов).

Потери потребителя в зависимости от того, на какое решение он ориентируется и каково было состояние погоды в действительности, описываются матрицей потерь данного потребителя, состоящей из четырех элементов:  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  и  $S_{22}$  (табл. 1). При этом предполагается, что при отсутствии опасного явления метеорологическая ситуация не оказывает вредного влияния на производство, т. е.  $S_{22} = 0$  (Абрамов, Ольшанский, 2004).

Таблица 1

**Матрица потерь, описывающая ситуацию  
«опасное явление—защитные мероприятия»**

Метеоусловия $F$	Хозяйственные решения	
	$d_1$ (защитные меры приняты)	$d_2$ (защитные меры не приняты)
$F_1$ (опасное явление наблюдалось)	$S_{11}$	$S_{12}$
$F_2$ (опасное явление не наблюдалось)	$S_{21}$	$S_{22}$

Смысл элементов  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{22}$  матрицы потерь следующий:

$S_{11}$  — суммарные потери, складывающиеся из затрат на проведение защитных мероприятий и непредотвратимых потерь от осуществившегося опасного явления;

$S_{21}$  — затраты потребителя на защитные мероприятия;

$S_{12}$  — потери потребителя при внезапном (непредусмотренном) возникновении опасного явления, когда защитные мероприятия предварительно не организовывались;

$S_{22}$  — потери потребителя при отсутствии опасного явления; обычно  $S_{22} = 0$ . Если это не так, то из всех элементов матрицы (см. табл. 1) можно вычесть величину  $S_{22}$ , отчего смысл элементов матрицы не изменится.

Между указанными величинами существуют следующие соотношения:

$$S_{21} \leq S_{11},$$

$$S_{11} < S_{12}.$$

В каждом отдельном случае при определении элементов  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  матрицы потерь потребителя необходимо учитывать особенности конкретных действий отрасли. Здесь же речь идет лишь об общих принципах определения этих величин.

1. Величина  $S_{12}$  характеризует потери потребителя при внезапном возникновении опасного явления; при этом ущерб может меняться в широких пределах в зависимости от аварийной ситуации. В связи с этим для определения величины  $S_{12}$  следует использовать статистический материал по последствиям осуществления опасных явлений, вследствие чего величина  $S_{12}$  будет представлять собой среднее значение ущерба при отсутствии защитных мер.

Основные составляющие потерь  $S_{12}$  при внезапном возникновении опасного явления следующие:

а) потери, связанные с материальным ущербом ( $b_1$ ), зависящие от интенсивности опасного явления и не являющиеся постоянными. Для их определения необходимо осреднять значительный объем данных о последствиях опасных явлений. Этот ущерб может быть вызван потерями из-за аварий, потерями трудоспособности какой-то части работающих, потерями хранящейся техники, продукции и т. д.;

б) потери, связанные с невыполнением или полным срывом планового объема работ ( $b_2$ ) из-за частичного или полного простоя людей, механизмов, техники и т. д.;

в) потери, связанные с расходами на мероприятия по ликвидации последствий опасных явлений, катастроф ( $b_3$ ).

Суммарные потери при внезапном возникновении опасного метеорологического явления описываются следующей формулой:

$$S_{12} = b_1 + b_2 + b_3. \quad (10)$$

2. Величина  $S_{11}$  характеризует потери потребителя в случае, когда неблагоприятное явление прогнозировалось и фактически наблюдалось.

При заблаговременном предупреждении об опасном явлении потребитель принимает защитные меры с целью предотвращения аварий, выполнения планируемого объема работ. Эти меры в общем случае не приводят к полному предотвращению потерь, которые складываются из:

а) потерь, связанных с авариями ( $a_1$ ), которые, несмотря на принятые меры защиты, все же остаются.

б) потерь, связанных с сокращением объема производства или увеличением времени на производство того же объема работ ( $a_2$ );

в) затрат, необходимых для принятия потребителем защитных мер при ожидаемом опасном явлении ( $a_3$ ).

Таким образом, общие потери при предупреждении описываются выражением

$$S_{11} = a_1 + a_2 + a_3. \quad (11)$$

3. Величина  $S_{21}$  характеризует потери потребителя в том случае, когда опасное явление прогнозировалось, но не наблюдалось. Тогда потери  $S_{21}$  равны затратам на защитные меры и состоят из:

а) потерь, связанных с сокращением объема производства ( $c_1$ ), из-за прекращения некоторых видов работ; при этом  $c_1 = a_2$ ;

б) потерь на защитные меры ( $c_2$ ); при этом  $c_2 = a_3$ .

Суммарные потери в этом случае описываются формулой

$$S_{21} = c_1 + c_2. \quad (12)$$

Следует иметь в виду, что в матрице потерь (см. табл. 1) приводятся осредненные потери (затраты), приходящиеся на один случай опасного явления. При невозможности учесть все потери потребителя при неблагоприятных метеоусловиях допускается использование одного-двух показателей, характеризующих потери (ущерб) данного потребителя от опасных метеорологических явлений.

Наряду с матрицей потерь, для оценки эффективности оперативного (инерционного) прогноза необходимо располагать характеристиками его оправдываемости, задаваемыми в виде матрицы совместных повторяемостей различных сочетаний прогнозируемых и осуществившихся погодных условий (табл. 2).

Элементы матрицы определяют делением соответствующего числа случаев  $n_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) на общее число испытаний  $N$ . Величина  $p_{12}$  находится делением на  $N$  числа случаев  $n_{12}$  неоправданного прогноза отсутствия опасного явления, величина  $p_{21}$  —

Таблица 2

**Матрица совместных повторяемостей прогностических и фактических метеоусловий**

Фактические метеоусловия $F$	Прогнозируемое метеоусловие		$\Sigma$
	$\Pi_1$ (ождается)	$\Pi_2$ (не ожидается)	
$F_1$ (опасное явление наблюдалось)	$p_{11} = n_{11}/N$	$p_{12} = n_{12}/N$	$p$
$F_2$ (опасное явление не наблюдалось)	$p_{21} = n_{21}/N$	$p_{22} = n_{22}/N$	$q$
$\Sigma$	$p'$	$q'$	1

делением на  $N$  числа случаев  $n_{21}$  неоправдавшегося прогноза осуществления опасного явления, величина  $p_{11}$  — делением на  $N$  числа случаев  $n_{11}$  успешных прогнозов осуществления, а величина  $p_{22}$  — делением на  $N$  числа случаев успешных прогнозов отсутствия опасного явления;  $p$  и  $q$  — соответственно природные повторяемости осуществления и отсутствия опасного явления,  $p'$  и  $q'$  — повторяемости прогноза наличия и отсутствия опасного явления независимо от фактической ситуации.

Определение элементов матрицы совместных повторяемостей прогнозируемых и фактических гидрометеоусловий для различных видов прогноза особых затруднений не вызывает.

Матрица может быть составлена для любого календарного периода, в течение которого возможно данное опасное явление. При этом период осреднения должен быть достаточным, чтобы получить характеристики оправдываемости данной прогностической методики.

Экономический эффект использования прогноза опасного явления по данной методике, как уже упоминалось выше, оценивается уменьшением средних потерь при стратегии ориентации на прогноз по сравнению с потерями при ориентации на стратегию пренебрежения прогнозом (отсутствие гидрометеорологической информации).

Используя данные матриц потерь (см. табл. 1) и совместных повторяемостей (см. табл. 2), получаем общие выражения для средних потерь при различных стратегиях:

стратегия пренебрежения прогнозом

$$R_2 = pS_{12}, \quad (13)$$

стратегия перестраховки (защитные меры применяются во всех случаях)

$$R_1 = p(S_{11} - S_{21}) + S_{21}, \quad (14)$$

стратегия доверия прогнозу

$$R_3 = p_{11}S_{11} + p_{12}S_{12} + p_{21}S_{21}. \quad (15)$$

Данные выражения для средних потерь при различных стратегиях не учитывают факторы заблаговременности прогноза и времени действия опасного явления, влияние которых на эффективность использования метеорологической информации для предотвращения последствий опасных погодных явлений в ряде случаев довольно существенно. Для их учета необходимо ввести коэффициент

$$K_{\text{ОЯ}} = 1 - \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ОЯ}}} \left( 1 - \frac{t_{\text{заб}}}{t_{\text{н}}} \right), \quad (16)$$

где  $t_{\text{н}}$  — время, необходимое для принятия комплекса защитных мер в полном объеме;  $t_{\text{ОЯ}}$  — время действия опасного гидрометеорологического явления;  $t_{\text{заб}}$  — время заблаговременности прогноза опасного явления (если  $t_{\text{заб}}$  больше  $t_{\text{н}}$ , то  $t_{\text{заб}}$  принимается равным  $t_{\text{н}}$ ).

Коэффициент  $K_{\text{ОЯ}}$  учитывается только в случае потерь при стратегиях с принятием защитных мер, т. е. при доверии прогнозу и перестраховке.

В качестве базовой стратегии, как уже упоминалось, принята стратегия пренебрежения прогнозом (его отсутствия), относи-

тельно которой определяются потери (ущерб) и экономический эффект для стратегии доверия и перестраховки, что значительно упрощает расчеты и позволяет использовать ПЭВМ.

Целесообразность той или иной стратегии определяется из следующих условий.

1. При  $\mathcal{E}_д > 0$  и  $\mathcal{E}_п > 0$  (где  $\mathcal{E}_д$  — экономический эффект при доверии прогнозу и  $\mathcal{E}_п$  — экономический эффект при перестраховке) целесообразны или стратегия доверия, или стратегия перестраховки. При этом если

$$\mathcal{E}_д = [p_{22}S_{21} - p_{12}(S_{12} - S_{11})]K_{ОЯ\text{ ср}} > 0, \quad (17)$$

то целесообразна стратегия доверия прогнозу.

2. Если

$$\mathcal{E}_п = [p_{22}S_{21} - p_{11}(S_{12} - S_{11})]K_{ОЯ\text{ ср}} < 0, \quad (18)$$

то целесообразна стратегия перестраховки.

3. В случае пренебрежения прогнозом  $\mathcal{E}_0 = 0$ .

Анализ общих выражений показывает, что при  $K_{ОЯ\text{ ср}} = 1$  они совпадают с известными выражениями для потерь (ущерба) и экономического эффекта при принятии в качестве базовой стратегии пренебрежения прогнозом или его отсутствия. При  $K_{ОЯ} = 0$  общие выражения совпадают с выражениями для потерь при стратегии пренебрежения прогнозом.

При  $0 < K_{ОЯ} < 1$  общие выражения отличаются от известных, позволяя более корректно вести расчеты потерь (ущерба) и экономического эффекта в тех случаях, когда влиянием заблаговременности прогноза и временем действия опасного явления пренебрегать нельзя.

Следует отметить, что наибольшее влияние  $K_{ОЯ}$  проявляется при отдельных опасных гидрометеорологических явлениях (экстремальных снегопадах), которые целесообразно при расчете экономического эффекта выделять в самостоятельную отчетность.

#### 4. Выбор стратегии принятия хозяйственного решения

Выбор стратегии принятия хозяйственного решения и оценка экономического эффекта основаны на одновременности расчета экономического эффекта  $\Theta_d$  и  $\Theta_n$  для различных стратегий (пренебрежение прогнозом, доверие прогнозу, перестраховка) с учетом значений  $K_{Oя\text{ ср}}$  и при автоматическом выборе оптимальной стратегии в соответствии с заданными условиями (табл. 3). Выбранная в этом случае стратегия сразу же определяет соответствующее ей значение экономического эффекта (Хондошко и др., 2003).

Таблица 3

**Варианты возможных стратегий принятия хозяйственных решений использования прогноза опасного явления потребителем**

Условие	Стратегия
$\Theta_d > 0, \Theta_n < 0$	Доверие прогнозу
$\Theta_d < 0, \Theta_n > 0$	Перестраховка
$\Theta_d < 0, \Theta_n < 0$	Пренебрежение прогнозом
$\Theta_d > 0, \left. \begin{array}{l} \Theta_d - \Theta_n > 0 \\ \Theta_n > 0 \end{array} \right\}$	Доверие прогнозу
$\left. \begin{array}{l} \Theta_d - \Theta_n < 0 \\ \Theta_n > 0 \end{array} \right\}$	Перестраховка

Одновременно определяются значения предотвращенного ущерба  $У_{пр}$ , непредотвращенных потерь  $У_{Oя}$  и затрат на защитные меры.

Суммарные значения экономического эффекта и ущерба будут определяться умножением полученных значений на продолжительность (длительность)  $N$  отчетного периода в случае суточных оперативных прогнозов или на число других прогнозов (часовых, трехчасовых и т. д.).

Элементы табл. 1 (матрица потерь) могут быть определены по статистическим осредненным данным потерь потребителя за определенный срок или же рассчитаны по соответствующим для каждой отрасли выражениям (Абрамов, Ольшанский, 2004):

$$Y_{\text{дн}} = pS_{12} - p_{11}(S_{12} - S_{11} + S_{21})K_{\text{оя ср}}, \quad (19)$$

$$Y_{\text{пн}} = pS_{12} - p(S_{12} - S_{11} + S_{21})K_{\text{оя ср}}, \quad (20)$$

$$Y_{\text{он}} = pS_{12}, \quad (21)$$

В формулах (19)—(21)  $Y$  — ущерб (непредотвращенные потери) при доверии, перестраховке и пренебрежении прогнозом соответственно.

Рассмотрим случай, когда погодные условия характеризуются двумя возможными состояниями — наличием или отсутствием экстремального снегопада, и в соответствии с этим потребитель либо проводит защитные мероприятия, либо нет. Ситуация принятия решения описывается матрицей оценочного функционала размерностью  $m \times n$ , элементы которой характеризуют доходы или потери потребителя, отвечающие всевозможным парам  $(F_i, d_i)$ . В простейшем случае потребитель располагает всего двумя возможностями и экономические последствия хозяйственных решений при различных вариантах прогнозируемых погодных условий описываются матрицей размерностью  $2 \times 2$ , представленной в табл. 1. В этом случае потенциальный экономический эффект (непредотвращенный ущерб, так как метеозащита не проводилась) при доверии к прогнозу и перестраховке будет определяться выражениями (19) и (20).

При проведении метеозащиты предотвращенный ущерб будет описываться следующими выражениями:

$$\mathcal{E}_{\text{дн}} = p_{11}(S_{12} - S_{11} + S_{21})K_{\text{оя ср}}, \quad (22)$$

$$\mathcal{E}_{\text{пн}} = p_{11}(S_{12} - S_{11} + S_{21})K_{\text{оя ср}}. \quad (23)$$

Затраты на метеозащиту при доверии прогнозу и перестраховке будут определяться формулами

$$\mathcal{Z}_{\text{дн}} = (p_{11} + p_{21})S_{21}K_{\text{оя ср}}, \quad (24)$$

$$\mathcal{Z}_{\text{пн}} = S_{21}K_{\text{оя ср}}. \quad (25)$$

## 5. Потенциальный экономический эффект метеозащиты при экстремальных осадках 9—13 декабря 2010 г.

Вариант 1. *Идеальный прогноз (доверие прогнозу).*

Исходные данные: увеличение высоты снежного покрова за четверо суток (рис. 1) от 21 до 57 см по данным измерений СЗУ УГМС (предполагается, что выпавший ранее снег ( $H = 20$  см) вывезен автотранспортом).

В связи с тем что рассматривается единичный случай при доверии к прогнозу, экономические показатели будут определяться выражениями (4)—(6).

Для хозяйственной деятельности Санкт-Петербурга неблагоприятным метеорологическим явлением считаются осадки, в результате выпадения которых формируется снежный покров высотой 10 см и более и которые приводят к частичной или полной остановке транспорта и прекращению других видов работ. В табл. 4 приведены ориентировочные потери для коммунального хозяйства Санкт-Петербурга по данным комитета по благоустройству города.

Уборка снега автотранспортом стоит 160—300 руб./м<sup>3</sup> (в среднем 230 руб./м<sup>3</sup>), площадь дорожного покрытия в Санкт-Петербурге составляет 54 млн м<sup>2</sup> (Козлов и др., 2011), плотность свежеснежавшего снега — 0,17 г/см<sup>3</sup>, плотность снега при наибольшей высоте — 0,22 г/см<sup>3</sup> (Копанев, 1978). Количество снега, которое необходимо убрать с улиц города, составит  $1,5 \cdot 10^7$  м<sup>3</sup>. Пло-

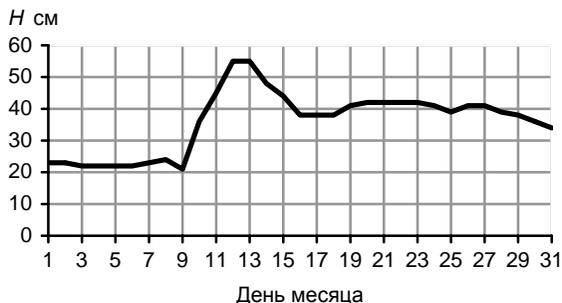


Рис. 1. Высота снежного покрова в декабре 2010 г.

Таблица 4

## Основные составляющие потерь

Составляющая	Потери, руб.
<i>Непредотвращенные потери потребителя при отсутствии метеозащиты</i>	
Вывоз снега автотранспортом (230 руб./м <sup>3</sup> )	$3,4 \cdot 10^9$
Очистка крыш от снега (30 руб./м <sup>2</sup> )	$2,1 \cdot 10^9$
Удаление сосулек (20 руб./м)	—
Суммарные затраты	$5,5 \cdot 10^9$
<i>Потенциальные затраты потребителя на метеозащиту</i>	
Подготовительные работы	$7,4 \cdot 10^6$
Исполнительные работы	$45,9 \cdot 10^6$
Прочие расходы	$9,1 \cdot 10^6$
Суммарные затраты	$62,4 \cdot 10^6$

щадь крыш, с которых необходимо убрать снег, равна 70 млн м<sup>2</sup>. С учетом того что сосульки после каждого снегопада не убираются, суммарные расходы составят  $5,5 \cdot 10^9$  рублей (см. табл. 4).

Затраты потребителя на метеозащиту состоят из оплаты подготовительных работ, исполнительных работ и накладных расходов. Основные затраты приходятся на исполнительные работы, которые состоят из оплаты работы воздушных судов и наземных служб руководства АВ (Колосков и др., 2010).

Для метеозащиты Санкт-Петербурга при приближении фронтальной облачности с интенсивными снегопадами необходимо непрерывно проводить работы по АВ с использованием от одного до шести самолетов (базовый вариант — три самолета) на удалении от города 30, 60, 90 км. Средняя стоимость одного часа работы воздушного судна типа Ан-12 с наземным обеспечением составляет 300 тыс. рублей (в ценах 2010 г.).

Длительность метеозащиты в период 9—13 декабря 2010 г. составила 51 ч (в период с 0 до 15 ч 11 декабря 2010 г. снегопад не наблюдался). Следовательно, суммарные затраты на метеозащиту составили 62,4 млн руб.

В табл. 4 не учтены потери, обусловленные невыполненными работами на открытом воздухе, оплата простоя рабочих, простоя механизмов, аварий (отключения электричества, ДТП, травмы и др.), которые существенны, но на несколько порядков меньше, чем приведенные в таблице.

Потенциальный экономический эффект будет равен (см. формулу (4)):

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_n - R_n = 5,5 \cdot 10^9 - 62,4 \cdot 10^6 \approx 5,44 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Экономическая эффективность составит:

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = \mathcal{E}_p / R_n = 5,44 \cdot 10^9 / 62,4 \cdot 10^6 = 87.$$

Следует предположить, что в результате физической эффективности метеозащиты было достигнуто уменьшение интенсивности снегопада, а не полное его предотвращение, что при современном уровне развития технологии АВ вполне естественно.

В результате снегопада в городе образовался снежный покров высотой 10 см. На уборку этого количества снега будет израсходован 1 млрд руб. Потенциальный экономический эффект будет равен  $4,44 \cdot 10^9$  руб. Экономическая эффективность (см. выражение (6)) составит  $\mathcal{E}_{\text{эф}} = 4,44 \cdot 10^9 / 62,4 \cdot 10^6 = 71$ .

*Следовательно, общий экономический эффект метеозащиты превышает затраты на метеозащиту в 71—87, что свидетельствует о значительном потенциальном эффекте.*

*Вариант 2. Перестраховка (прогноз экстремального снегопада не оправдывается — готовность к метеозащите сохраняется в течение 30 дней).*

Таблица 5

Потенциальные затраты потребителя на метеозащиту	
Подготовительные работы	7,4 млн руб.
Исполнительные работы	16,2 млн руб.
Прочие расходы	9,1 млн руб.
Суммарные затраты	32,7 млн руб.

В этом случае исполнительные работы состоят в том, чтобы сохранять в готовности три воздушных судна, гарантированный налет которых в месяц составляет 60 ч по 90 000 руб./ч (5,4 млн руб. · 3 = 16,2 млн руб.).

Вариант 3. *Исходные данные без изменений — метеозащита не проводилась* (пренебрежение прогнозом — наихудший вариант). Фактические финансовые потери могут достигать  $5,5 \cdot 10^9$  рублей, экономический эффект  $\Theta = 0$ .

### Выводы

Оценка экономического эффекта метеозащиты основана на использовании ряда методов, которые следует рассматривать как общее методическое руководство для выработки оптимальной стратегии и оценки ее эффективности в каждом конкретном случае метеозащиты. Для того чтобы оценить потенциальные потери от конкретного снегопада, необходимо провести метеоролого-экономическое моделирование предотвращенных потерь. Рассмотренные схемы и иллюстрирующий их пример относятся к одному конкретному, однако довольно характерному случаю экстремальных снегопадов, когда высота снежного покрова за четыре дня увеличилась на 36 см. Общий экономический эффект метеозащиты от снегопадов превышает в этом случае затраты на метеозащиту в 71—87 раз (признанный мировой стандарт 1 к 10).

При решении каждой конкретной задачи требуется всесторонний анализ возможных потерь (убытков) и затрат потребителя на метеозащиту на основе детального изучения возможных решений потребителя. Таким образом, анализ предотвращенных потерь от конкретного снегопада позволит найти подход, который через метеозащиту реализует максимальную экономическую полезность предотвращения (снижения интенсивности) снегопада. Для успешного решения поставленной задачи рекомендуется создание специальной комиссии (штаба) по борьбе со снегом с участием специалистов в области метеорологии и представителей комитета по благоустройству города.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Абрамов Г. Ф., Ольшанский Я. Ю.* (2004). Методика компьютерных типовых расчетов экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации отраслями экономики (авиапредприятия, лесное хозяйство). Проект. — СПб, изд. ГГО. 21 с.

*Абшаев М. Т., Малкарова А. М.* (2006). Оценка эффективности предотвращения града. — СПб: Гидрометеиздат. 280 с.

*Бедрицкий А. И., Коршунов А. А., Хандожко Л. А., Шаймарданов М. З.* (2001). Метеоролого-экономическое моделирование предотвращения потерь // Метеорология и гидрология. № 2. С. 5—13.

*Берюлев Г. П., Данилян Б. Г., Зимин Б. И., Корнеев В. П., Федоров О. К., Сафронова И. М.* (2006). Проведение работ по искусственному регулированию погодных условий в мегаполисах. Методические указания: РД 52.11.677—2006. — М.: Метеоиздательство. 32 с.

*Вимберг Г. П., Брагинская Л. Л., Жуковский Е. Е., Кондратюк В. И., Кривошеева Е. В., Куприенко В. Г.* (1985). Методика определения экономической эффективности использования гидрометеорологической информации в народном хозяйстве. — Л., изд. ГГО. 126 с.

*Жуковский Е. Е.* (1981). Метеорологическая информация и экономические решения. — Л.: Гидрометеиздат. 303 с.

*Имянитов И. М.* (1985). Метод оценки экономической эффективности метеорологических мероприятий и его приложения. — Л.: Гидрометеиздат. 40 с.

*Козлов В. Н., Мазуров Г. И., Акселевич В. И.* (2011). Оценка экономической эффективности искусственного регулирования зимних ливневых осадков над мегаполисом на примере Санкт-Петербурга // Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 24—28 октября 2011 г. — Нальчик, с. 144—146.

*Колосков Б. П., Корнев В. П., Петров В. В., Берюлев Г. П., Данилян Б. Г.* (2010). Современная концепция метеозащиты мегаполисов методами активных воздействий // Метеорология и гидрология. № 8. С. 21—32.

*Копанев И. Д.* (1978). Снежный покров на территории СССР. — Л.: Гидрометеиздат. 182 с.

*Мелешко В. П., Мещерская А. И., Хлебникова Е. И.* (2010). Климат Санкт-Петербурга и его изменения. — СПб, изд. ГГО. 256 с.

*Хандожко Л. А.* (2005). Экономическая метеорология. — Л.: Гидрометеиздат. 491 с.

*Хандожко Л. А., Коршунов А. А., Фокичева А. А.* (2003). Выбор оптимального погодо-хозяйственного решения на основе прогноза опасных гидрометеорологических условий // Метеорология и гидрология. № 1. С. 5—17.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ  
МЕТЕООБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ**

*В. И. Кондратюк<sup>1</sup>, Д. Н. Медведев<sup>2</sup>, С. М. Персин<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup> ООО «Институт геофизического приборостроения»  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: igp@igp.spb.ru

Поступила в редакцию 12.09.2012

**Введение**

В последние два десятилетия во всем мире наблюдается тенденция активного технического переоснащения национальных гидрометеорологических и других служб наблюдений за окружающей природной средой. Это обусловлено прогрессом в области микроэлектроники, компьютеризации, технологий преобразования различных физических величин в электрические, методов разработки программного обеспечения, технологий телекоммуникаций и др.

Переход к автоматическим измерениям порождает такое количество гидрометеорологической информации, которое на порядки превосходит ее прежний объем. При этом возникают потоки дублирующей информации от различных источников, обусловленные, прежде всего (если вести речь о системах наблюдений за состоянием приземного слоя воздуха), структурой национальных наблюдательных сетей, представленных двумя составляющими: государственной и ведомственной (коммерческой) наблюдательными сетями.

Внутри каждой из этих сетей эффект дублирования возникает из-за выполнения параллельных наблюдений (измерений) за от-

дельными метеорологическими величинами (параметрами) в различных по назначению наблюдательных системах. Например, находящиеся неподалеку друг от друга автоматизированные метеорологический (авиаметеорологический) и актинометрический комплексы производят наряду со специальными измерениями наблюдения за температурой и влажностью воздуха, параметрами ветра и др. В результате возникает дублирование перечисленных в этом примере наблюдаемых (измеряемых) метеорологических величин.

Помимо эффекта дублирования, можно выделить явление иного характера. Оно заключается в недостаточно полном использовании потенциального информационного ресурса специализированных автоматизированных метеорологических и иных комплексов и станций. Например, на автоматизированном метеорологическом комплексе (АМК) допустимо размещение актинометрических датчиков. Реализовав эту возможность и дополнив программное обеспечение (ПО) АМК специализированным программным модулем обработки актинометрических величин, можно получать от такого автоматизированного комплекса наряду с метеорологической и актинометрическую информацию. В результате плотность сети пунктов актинометрических наблюдений возрастает. Затраты при этом существенно ниже как при формировании такого комплекса, так и при его эксплуатации в сравнении с вариантом самостоятельного автоматизированного актинометрического комплекса.

Другим примером может служить использование потенциального информационного ресурса аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем в целях повышения плотности сети общих метеорологических наблюдений. Информация от каждой из таких систем способна, по экспертным оценкам, перекрыть по составу и объему поток стандартной информации любой АМК, автоматической метеорологической станции (АМС).

Организация комплексных автоматизированных наблюдательных подразделений (систем), совмещающих функции различных специализированных наблюдательных подразделений (НП), может рассматриваться как процесс их интеграции. Расширение интеграции приводит к снижению стоимости получаемой метеорологической и примыкающих к ней иных видов

геофизической информации. Оно обусловлено не только уменьшением затрат на аппаратурную интеграцию и расходов на обслуживание. Благодаря формированию интегрированных потоков информации, не содержащих дублирующих составляющих, уменьшается нагрузка на каналы связи.

Вопрос об интеграции, таким образом, тесно связан с оптимизацией автоматических метеорологических измерительных комплексов с точки зрения их состава, структуры, программного обеспечения, достижения однородности данных (Hadeen, Guttman, 1994), а также ведения их фонда (Шаймарданов, 1997, 2011).

Тенденции в области интеграции принимаются во внимание и при осуществлении ряда проектов и программ ВМО, например глобальной системы наблюдений (ГСН).

Экономические аспекты, связанные с оптимизацией источников исходной метеорологической информации, рассматривались в работах как отечественных (Кондратюк, Покровский, 1997), так и зарубежных (Бейссон, 1997) авторов.

Возможности комплексирования АМК и аэродромной метеорологической информационно-измерительной системы (АМИИС) рассматриваются с учетом их технических и эксплуатационных характеристик.

### **Использование информации АМИИС для решения задач метеорологической сети Росгидромета**

В связи с внутриэкономическими причинами в последние десятилетия XX века плотность сети пунктов метеорологических наблюдений в России снизилась и в настоящее время существенно меньше, чем, например, в США или КНР. С другой стороны, метеорологическое обеспечение авиации поддерживается на нормированном уровне автоматическими аэродромными метеорологическими станциями, в последнем поколении которых активно используются компьютерные и телекоммуникационные технологии.

Информационные возможности таких станций привлекают внимание к ним как к дополнительным потенциальным источникам информации — оперативной (Код для оперативной пере-

дачи данных..., 1989) и режимной (Методические указания..., 2000). Такие станции способны отчасти восполнить дефицит метеорологической информации из-за недостаточного числа пунктов метеорологических наблюдений на территории России.

Осуществляемая в настоящее время в системе Росгидромета масштабная программа технического переоснащения организаций Росгидромета предусматривает перевод метеорологических наблюдений на новые технологии, в основу которых положена автоматизация таких наблюдений с помощью компьютеризированных АМК и АМС.

Таким образом, возникает задача взаимоувязки двух потоков информации, или, иначе говоря, интеграции потоков информации от указанных двух автоматизированных крупных подсистем метеонаблюдений. Находящаяся в стадии модернизации метеорологическая сеть Росгидромета (подсистема стандартных метеонаблюдений) содержит около 1640 АМК и более 300 АМС (Кондратюк, 2011), а число уже функционирующих высокотехнологичных АМИИС превышает 100. Принимая во внимание необходимость оснащения АМИИС всех 400 действующих аэропортов (включая малые) и не входящих в это число строящихся аэропортов и вертодромов, очевидна перспектива достижения позитивного эффекта (увеличения плотности сети пунктов метеорологических наблюдений и повышения интенсивности наблюдений) в результате решения рассматриваемой задачи.

### **Определение возможности удовлетворения АМИИС требованиям к характеристикам потока метеоинформации от АМК**

Ответ на вопрос о возможности удовлетворения АМИИС таким требованиям может быть получен из сопоставления требований к АМИИС и к АМК. Последней должен быть укомплектован как минимум датчиками давления, температуры, влажности, параметров ветра и осадков, которые образуют базовый комплект. Должны быть сформулированы требования к автоматизированному рабочему месту (АРМ) оператора (техника-метеоролога) АМК.

АРМ оператора АМК должно включать следующие компоненты:

- программно-аппаратный комплекс ручного ввода данных визуальных наблюдений, базирующийся на стандартном персональном компьютере;
- программный комплекс отображения и контроля результатов автоматических измерений и визуальных наблюдений;
- программный комплекс сжатия информации для передачи на средства передачи информации.

Специальное программное обеспечение (СПО) для АРМ оператора АМК должно отвечать следующим требованиям:

- иметь сертификат (аттестат) для применения на метеорологической сети Росгидромета (включая алгоритмы, программы кодировки наблюдаемых характеристик в принятых форматах, внутристанционной обработки и контроля результатов наблюдений и др.);
- предоставлять возможность редактирования измеренных в автоматическом режиме параметров;
- обеспечивать первичную обработку результатов наблюдений в соответствии с руководящим документом (Наставление..., 1985);
- иметь справочную систему;
- предусматривать интерфейс для обмена текстовыми сообщениями между оператором АМК и оператором центра сбора данных (ЦСД);
- реализовывать механизм управления отправкой оперативных и режимных сообщений;
- обеспечивать хранение результатов наблюдений после их первичной обработки в течение не менее шести месяцев;
- обеспечивать обработку измеренных и введенных визуально определенных метеорологических величин (параметров) с использованием вычислений и статистических функций (например, экстремальные, средние значения).

Анализ требований к АМК является существенным для последующих мероприятий не только с точки зрения возможностей интеграции, но и с позиций оптимизации такого комплексирования. Выявленные в процессе такого анализа некоторые особенности интеграции систем при их учете значительно расширяют возможности повышения качества и объема получаемой в автоматизированном режиме информации.

Основным направлением для этого является расширение базового набора датчиков, установленных на сети АМК, за счет включения следующих датчиков: твердых, смешанных и жидких осадков (весовой осадкомер), высоты снежного покрова, продолжительности солнечного сияния, метеорологической дальности видимости (нефелометр), температуры почвы на глубинах (комплект). Последний выполнен в виде группового, т. е. многоканального устройства с собственным простым контроллером, который подключается к общему контроллеру АМК двухпроводной линией (по последовательному каналу).

Предлагаемые для укомплектования в ближайшее время датчики уже выпускаются различными фирмами и имеют приемлемую цену. Они позволят не только получить измеряемые ими данные, но и расширить число вычисляемых величин и идентифицируемых автоматически явлений.

Относительно недавно возможность автоматизации наблюдений за состоянием подстилающей поверхности была лишь предметом обсуждения (Gaumed, 1992). В настоящее время во Франции налажен серийный выпуск датчиков, реализующих эту функцию, и ими оснащена национальная метеорологическая сеть.

В последние десятилетия активизировались исследования и разработки, направленные на обеспечение автоматического определения состояния неба, прежде всего форм облаков (Аллёнов и др., 2006; Персин, 1987; Coombes, Harrison, 1985).

Предметом дальнейшей автоматизации являются также наблюдения за неблагоприятными и опасными атмосферными явлениями (РД 52.04.563—2002). Решение этой задачи предполагает как использование новых датчиков, так и развитие программно-алгоритмических средств.

Перспектива автоматизации всей актинометрической сети (а не только двух десятков станций) ставит вопрос о возможности совмещения в одном АРМ функций приема, обработки и передачи метеорологической и актинометрической информации при условии, что актинометрический участок расположен на метеорологической площадке. В этом случае отпала бы необходимость устанавливать в АМК датчик солнечного сияния, так как информация о продолжительности солнечного сияния поступала бы от

актинометрической части интегрированной системы — автоматизированного метеоактинометрического комплекса (АМАК).

С другой стороны, в актинометрическую часть АМАК от метеорологической части поступали бы необходимые для повышения точности актинометрической информации данные о скорости ветра, температуре и влажности воздуха, высоте снежного покрова. При таком подходе упрощалась бы также реализация задач, связанных с передачей сообщений, и работа дежурного техника-метеоролога.

### **Технические и информационные возможности АМИИС**

Современная АМИИС и ее ПО, помимо выполнения функций специфического назначения, способны обеспечить выполнение всех перечисленных актуализированных и перспективных функций АМК при оснащении ПО АМИИС соответствующим программным модулем и двумя-тремя дополнительными датчиками.

Дополнительно необходимо организовать со стороны АМИИС передачу данных в ЦСД по согласованному протоколу. При этом, как и в АРМ АМК, должен быть реализован механизм управления отправкой оперативных и режимных сообщений и предусмотрен интерфейс для обмена текстовыми сообщениями между оператором АРМ АМИИС и оператором ЦСД.

Из сопоставления характеристик метеорологической информации от АМК и АМИИС следует, что для обеспечения унифицированного по составу потока информации АМИИС должна быть дополнительно оснащена датчиками температуры поверхности почвы, датчиком жидких, смешанных и твердых осадков, а также (не во всех случаях) комплектом датчиков температуры почвы на глубинах, включая глубину узла кущения (3 см).

Данные, которые поступают от АМК, частично измеряются (вычисляются) датчиками АМК и частично определяются визуально техником-метеорологом. В АМИИС же поступают данные от датчиков видимости, высоты облаков, погоды (явления) в срок и за время, предшествующее сроку. Кроме того, в состав АМИИС могут входить подсистема (или датчик) определения состояния подстилающей поверхности и датчик грозы. По результатам измерений система может выдавать оценку количества облаков.

Для современных АМИИС характерны: высокий уровень качества датчиков, наличие датчиков (идентификаторов) явлений, например идентификатора погоды (FD12P и DPD11A) и видов осадков (Elomaa et al., 1994; Van der Meulen, 1992; Lonnqvist, Nylander, 1992), обилие сервисных решений, разнообразие форм организации телекоммуникации и используемых нетрадиционных систем связи (оптоволоконные, спутниковые, сотовые).

Кроме того, наметилась тенденция к созданию базовых аппаратных и программных продуктов и разнообразных опций, обеспечивающих дифференциацию (в зависимости от назначения) информационно-измерительных метеорологических систем — аэродромных (отдельно для больших, средних, малых аэропортов, а также вертодромов), синоптических, климатических, специальных (например, исследовательских). Применяемые в АМИИС методы статистической обработки данных для компенсации влияния методических погрешностей измерений высоты облаков, видимости и параметров ветра на аэродроме могут быть использованы в других приложениях в связи с рассматриваемой задачей.

Уместно заметить, что подавляющая часть инноваций в области информационных технологий при выполнении метеорологических наблюдений реализуется вначале в АМИИС. В связи с этим те перспективные решения, которые упоминались выше, на первом этапе их внедрения также используются в АМИИС. Современные тенденции развития АМИИС (Персин, 2008) подтверждают это.

Технология применения автоматических АМИИС в качестве источников оперативной (синоптической) и режимной (климатической) информации основывается на решении широкого круга задач. Спектр задач простирается от физико-методических и измерительно-технических до экономических и организационно-юридических.

Выполненная на данном этапе работа указывает на то, что решение проблемы восполнения дефицита метеорологической информации (из-за недостаточной плотности сети пунктов метеорологических наблюдений), необходимой для формирования оперативных сообщений и режимных обобщений, реализуемо как в техническом, так и в экономическом отношении путем организации соответствующих потоков информации от автоматических аэродромных метеостанций и подготовки ЦСД к их приему и обработке.

Полученные выводы и отечественный опыт разработки и применения компьютеризированных автоматических метеорологических систем позволяют с уверенностью утверждать, что использование АМИИС для получения оперативной и режимной информации по полным форматам в системе сетевых метеорологических измерений возможно и целесообразно.

### Заключение

Выполненный анализ подтверждает реальную возможность осуществления оптимизации процесса получения исходной метеорологической информации о состоянии приземного слоя атмосферы. Средствами оптимизации являются интеграция как отдельных подсистем наблюдений, так и потоков информации от специализированных наблюдательных систем. Дальнейшее развитие работ в этом направлении предполагает анализ конкретных методических и технических решений, а также осуществление мероприятий организационно-экономического характера.

Следует принять во внимание благоприятный характер текущей ситуации для реализации таких мероприятий: поскольку осуществляются модернизация и техническое перевооружение наблюдательной сети Росгидромета, то работы по интеграции логично рассматривать как естественную составную часть этого проекта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Алленов М. И., Иванов В. Н., Кондратюк В. И., Третьяков Н. Д. (2006).* Автоматизированная система параметризации и распознавания форм облачности / В сб.: Тезисы докладов на Международном симпозиуме стран СНГ «Атмосферная радиация». — СПб: Гидрометеоздат, с. 137.

*Бейссон Ж.-П. (1997).* Экономическая ценность метеорологии // Бюлл. ВМО. Т. 46, № 3. С. 311—317.

Код для оперативной передачи данных приземных гидрометеорологических наблюдений с сети станций Госкомгидромета СССР, расположенных на суше (включая береговые станции) КН-01 — национальный вариант международного кода FM-12-IX SYNOP (1989). — Л.: Гидрометеоздат. 64 с.

*Кондратюк В. И., Покровский О. М. (1997).* Информационно-экономическая модель наземной сети и управленческие решения / В сб.: Тезисы докладов на

Симпозиуме «Гидрометеорология: наука и практика, современность и перспектива», СПб, 12 — 14 ноября. — СПб: Гидрометеоздат, с. 11.

*Кондратьев В. И.* (2011). Модернизация метеорологической сети Росгидромета: научно-методическое и организационное обеспечение проекта модернизации сети // Труды ГГО. Вып. 564. С. 19—39.

Методические указания по автоматизированной обработке гидрометеорологической информации (2000). Вып. 3. Метеорологическая информация неавтоматизированных гидрометеорологических станций и постов. Ч. 1. Метеорологическая информация станций. Раздел 1. Занесение информации на технический носитель. — Обнинск: Изд.-во ВНИИГМИ—МЦД.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, часть 1. Метеорологические наблюдения на станциях (1985). — Л.: Гидрометеоздат, 1985. 304 с.

Оперативно-производственное совещание «Модернизация метеорологической сети, результаты, проблемы, пути решения» (результаты реализации Проекта «Модернизация и техническое перевооружение организаций и учреждений Росгидромета») (2011) // Труды ГГО. Вып. 564. С. 279—282.

*Персин С. М.* (1987). Измерение высоты нижней границы облаков и характеристик облачности как задача распознавания образов // Труды ГГО. Вып. 512. С. 79—91.

*Персин С. М.* (2008). Современные тенденции развития аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем // Метеоспектр. № 1. С. 140—142.

РД 52.04.563—2002. Инструкция. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормовых сообщений.

*Шаймарданов М. З.* (1997). Современные информационные технологии создания и ведения государственного фонда данных по гидрометеорологии и контролю природной среды / В сб.: Тезисы докладов на симпозиуме «Гидрометеорология: наука и практика, современность и перспектива», СПб, 12—14 сентября. — СПб: Гидрометеоздат, с. 35—37.

*Шаймарданов В. М.* (2011). Организация контроля качества информации, включаемой в фонд данных // Труды ГГО. Вып. 564. С. 166—177.

*Elomaa E., Komulainen M.-L., Rissanen P., Tammelin B.* (1992). Corrections of surface observations / In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation. TECO-92, Vienna, Austria, 11—15 May 1992 // Rep. № 49. WMO/TD No. 462. P. 441—445.

*Elomaa E., Valkovari P., Andersson T.* et al. (1994). A present weather sensor field test and intercomparison / In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation. TECO-94, Geneva, Switzerland, 28 Feb. — 2 March 1994 // Rep. No. 57. WMO/TD. No. 588. P. 51—56.

*Gaumed J. L., Salomon P. (1992).* Un nouvel instrument meteorologique pour determiner l'etat du sol / In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation. TECO-92, Vienna, Austria, 11—15 May 1992 // Rep. No. 49. WMO/TD No. 462. P. 336—340.

*Van der Meulen J. P. (1992).* A comparison of two present weather systems with human Observations / In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation. TECO-92, Vienna, Austria, 11—15 May 1992 // Rep. No. 49. WMO/TD. No. 462. P. 45—50.

*Hadeen K. D., Guttman N. B. (1994).* Homogeneity of data and the climate record / In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation. TECO-94, Geneva, Switzerland, 28 Feb. — 2 March 1994 // Rep. No. 57. WMO/TD. No. 588. P. 3—11.

*Lonnqvist J., Nylander P. A present weather instrument (1992) / In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation. TECO-92, Vienna, Austria, 11—15 May 1992 // Rep. No. 49. WMO/TD. No. 462. P. 290—294.*

## **АВТОМАТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ АЭРОДРОМА**

*С. М. Персин<sup>1</sup>, Л. В. Анискин<sup>1</sup>, Д. Н. Медведев<sup>2</sup>, В. Н. Попов<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> ООО «Институт геофизического приборостроения»  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: igp@igp.spb.ru

Поступила в редакцию 8.09.2012

Поступила после доработки 30.10.2012

Климатические характеристики аэродромов необходимы для метеорологического обеспечения полетов воздушных судов, бесперебойности и регулярности авиаперевозок.

Для получения репрезентативных климатических характеристик требуется накопление большого массива измеренных и наблюдаемых данных, формирование архивов опасных и неблагоприятных для авиации явлений и условий, составление месячных и годовых таблиц их повторяемости и продолжительности. Кроме того, необходимо определение суточного и годового хода, условий погоды различной степени сложности, включая опасные явления.

Использование для этих целей современных технологий измерений и обработки данных, в частности аэродромных информационно-измерительных систем (АМИИС), все более широко внедряемых на аэродромах гражданской авиации, позволяет упростить и ускорить сбор, накопление и обработку данных метеонаблюдений, повышает их достоверность и объективность, предоставляет возможности для наглядного и мультимедийного представления информации (таблицы, графики и диаграммы).

Благодаря практически повсеместному внедрению АМИИС различного класса на аэродромах и посадочных площадках использование их возможностей по сбору и накоплению метеороло-

гических данных позволяет обеспечивать детальной климатической информацией новые районы. Разумеется, это возможно только при условии максимальной автоматизации процесса сбора и обработки данных измерений и наблюдений на всех этапах.

Для решения вопросов автоматизации формирования климатических характеристик аэродромов в состав аппаратно-программного комплекса современных АМИИС (например, АМИС-РФ) включают специальные программно-аппаратные модули, и в частности автоматизированное рабочее место АРМ-Климат, структурно-функциональная схема которого приведена на рис. 1.

В процессе согласованной работы АРМ-Климат и ядра системы АМИС-РФ осуществляется накопление и обработка данных метеозмерений, поступающих от АМИС-РФ, для автоматического формирования архивов данных наблюдений и составления климатических характеристик и компонентов описания аэродрома.

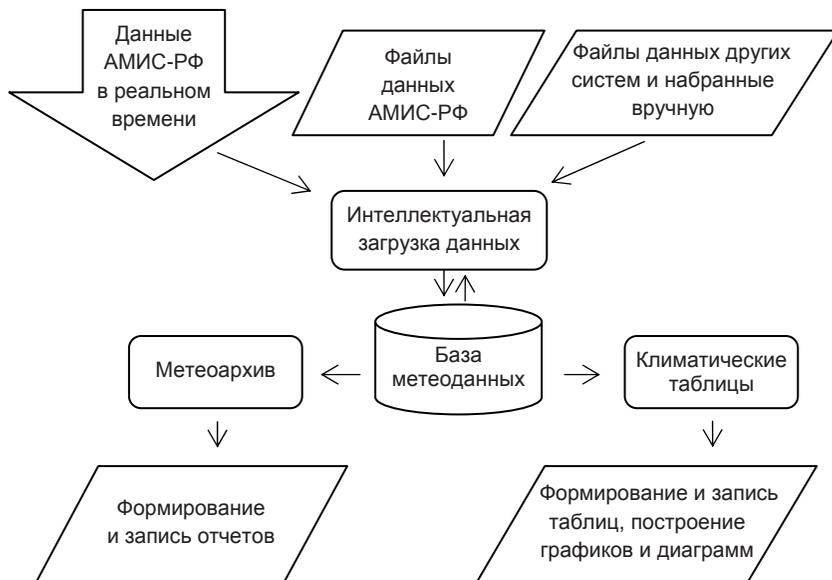


Рис. 1. Структурно-функциональная схема АРМ-Климат.

Программа АРМ-Климат архивирует данные и хранит всю измеренную АМИС-РФ и введенную вручную метеоинформацию, а также сформированные на основе этой информации таблицы за период не более 10 лет.

Данные архива в ядре АМИС-РФ формируются за получасовые сроки как результат осреднения за 10 мин результатов непрерывных измерений и наблюдаемых данных за полчаса, предшествующих сроку. Для формирования архивов климатических данных используются не только данные, поступившие в систему в результате работы автоматических средств измерения (датчиков), но также и данные, введенные вручную наблюдателем в процессе оперативного метеорологического обслуживания взлета и посадки воздушных судов.

В ядре системы АМИС-РФ данные наблюдений хранятся 91 день. В течение этого времени они должны быть перенесены теми или иными средствами загрузки в базу данных подсистемы АРМ-Климат.

Существующие конфигурации системы АМИС-РФ с подсистемой АРМ-Климат предполагают широкий выбор средств для переноса данных непрерывных измерений и наблюдений в базу метеорологических данных для последующего хранения и обработки, и в частности на настоящий момент:

1) механизм, обеспечивающий полностью автоматическое непрерывное поступление измерительных данных из ядра АМИС-РФ в подсистему АРМ-Климат в режиме реального времени с использованием выделенных каналов связи или локальной сети; данный режим позволяет полностью освободить персонал авиационной метеостанции от рутинных работ, связанных со сбором и накоплением климатических данных;

2) перенос накопленных на компьютерах центральной системы АМИС-РФ метеорологических архивов с помощью сменных носителей на периодической основе (рекомендуемая периодичность переноса данных один месяц); в случае использования данной технологии переноса данных отпадает необходимость в работе компьютеров АРМ-Климат в круглосуточном режиме, а также в поддержании непрерывного канала связи между центральной системой АМИС-РФ и АРМ-Климат;

3) загрузка в базу АРМ-Климат данных, полученных из источников, отличных от АМИС-РФ, в частности набранных вручную (для этой операции пользователям системы предоставляются специальные средства) или полученных от других АМИИС; поддерживается загрузка метеорологических архивов в формате «Структура записи метеорологической информации в архив на электронных носителях» в формате требований руководящих документов (РД 52.21.692—2007).

Загрузка данных в базу производится с использованием специальных интеллектуальных средств, содержащих механизмы разрешения конфликтов, возникающих при повторной загрузке данных за один и тот же срок наблюдения, в частности в случае одновременного поступления данных с основного и резервного комплектов центральной системы АМИС-РФ, находящихся в режиме работы с горячим резервом, т. е. выделение и приоритизация данных с основного на данный момент комплекта и заполнение лагун в потоке данных с использованием информации от резервного комплекта.

Хранение климатических данных в единой базе данных возможно на основе нескольких современных систем управления базами данных (СУБД), как коммерческих, так и распространяющихся на бесплатной основе — по выбору потребителя. Применение промышленных программных средств хранения данных позволяет в полной мере воспользоваться хорошо проработанными индустрией механизмами обеспечения надежности хранения, резервного копирования, переноса и пр., что особенно актуально, с учетом того что решаемая задача предполагает хранение данных на временной перспективе до 10 лет.

Информация, накопленная в базе данных, может быть в любой момент проверена оператором, в случае необходимости загружена повторно или изменена и дополнена. Информация за любые периоды наблюдения, присутствующая в базе данных, может быть распечатана или экспортирована на внешний носитель в стандартизованном формате для передачи другим потребителям. Структура табличного представления импортируемых и экспортируемых данных в стандартном формате приводится в табл. 1.

Таблица 1

**Структура записи метеорологической информации в архив  
на электронных носителях**

Аббревиатура элемента	Название элемента
INDEX	Синоптический индекс
YEAR	Год
MONTH	Месяц
DAY	День
HOUR	Часы
MIN	Минуты
LTD	Рабочий курс взлета (посадки)
NR	Номер ВПН (код)
DD	Направление ветра у земли (град.)
FF	Средняя скорость ветра у земли (м/с)
FFM	Максимальная скорость ветра у земли (м/с)
DDH	Направление ветра на высоте hh (град.)
FFH	Средняя скорость ветра на высоте hh (м/с)
DDR	Направление ветра на круге (град.)
FFR	Средняя скорость ветра на круге (м/с)
VV	Горизонтальная дальность видимости (м)
PP	Градации яркости ОВИ
WR	Горизонтальная дальность видимости (м) на ВПП по ОВИ
W	Погода 1 (код КН-01)
W1	Погода 2 (код КН-01)
W2	Погода 3 (код КН-01)
N	Общая облачность (октант)
NH	Нижняя облачность (октант)
F1	Форма облаков 1 (код)
F2	Форма облаков 2 (код)
F3	Форма облаков 3 (код)
F4	Форма облаков 4 (код)
H	ВНГО, вертикальная видимость (м)
T	Температура воздуха (0,1 °С)

Аббревиатура элемента	Название элемента
TD	Температура точки росы (0,1 °С)
F	Относительная влажность (%)
E	Парциальное давление водяного пара (0,1 гПа)
PPP	Давление на уровне установки барометра (0,1 гПа)
RRR	Количество осадков (мм)
TR	Продолжительность осадков (ч)
QFE	Давление на уровне аэродрома (0,1 гПа)
QNH	Давление на уровне моря (0,1 гПа)
TUR	Интенсивность болтанки (код)
TURH1	Нижняя граница слоя болтанки (м)
TURH2	Верхняя граница слоя болтанки (м)
ICE	Интенсивность обледенения (код)
ICEH1	Нижняя граница слоя обледенения (м)
ICEH2	Верхняя граница слоя обледенения (м)

На основе измеренной и наблюдаемой информации, хранящейся в базе данных АРМ-Климат, с помощью средств, входящих в комплект программного обеспечения, персонал АМСГ может выполнить формирование множества различных таблиц, графиков и диаграмм, необходимых для составления климатического описания аэродрома.

В перечень основных формируемых таблиц и графиков входят:

1) повторяемость (%) градаций видимости и/или высоты нижней границы облаков, покрывающих более 1/2 неба;

2) повторяемость (%) градаций видимости ниже заданных значений;

3) повторяемость (%) градаций высоты нижней границы облаков нижнего слоя, покрывающих более 1/2 неба;

4) повторяемость (%) градаций направления и скорости ветра;

5) повторяемость (%) градаций температуры воздуха;

6) повторяемость (%) явлений погоды (гроза, гололед, метель, град, пыльная/песчаная буря, дымка/мгла, туман, морось, дождь, ливневый дождь, снег, ливневый снег);

7) повторяемость (%) непрерывной продолжительности явлений погоды (гроза, гололед, метель, град, пыльная/песчаная буря, дымка/мгла, туман, морось, дождь, ливневый дождь, снег, ливневый снег);

8) повторяемость (%) градаций горизонтальной видимости при атмосферных явлениях (гроза, гололед, метель, град, пыльная/песчаная буря, дымка/мгла, туман, морось, дождь, ливневый дождь, снег, ливневый снег);

9) среднее атмосферное давление (гПа) на уровне аэродрома;

10) повторяемость минимумов погоды аэродрома;

11) повторяемость (%) градаций высоты нижней границы облаков при определенных значениях температуры воздуха и дефицита точки росы;

12) средние, максимальные и минимальные значения метеопараметров за месяц (температура, давление и скорость ветра);

13) повторяемость (%) условий погоды различной степени сложности при определенных скорости и направлении ветра.

Предусмотрены средства изменения логики отбора информации (например, выбрать необходимые градации температуры либо границы столбцов высоты нижней границы облаков при построении таблиц).

Сформированные таблицы могут быть распечатаны в форме, удобной для интеграции в отчет.

Для увеличения наглядности при графическом представлении данных широко используется цветовая маркировка, в том числе при выводе на печать.

Помимо обычных графиков, для представления данных могут быть построены различные диаграммы. На рис. 2 в качестве примера приведена диаграмма, построенная по данным наблюдений АМЦ Нижний Новгород (Стригино) за период с января 2001 г. по декабрь 2010 г.

Помимо набора стандартных таблиц, заложенных разработчиками данного программного продукта, возможен экспорт любого сформированного ряда данных для последующей обработки дополнительным внешним программным обеспечением.

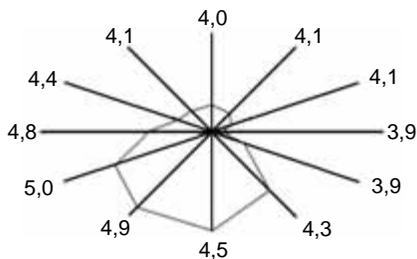


Рис. 2. Повторяемость направлений ветра и средняя скорость ветра (м/с) по направлениям.

Климатическая информация, накапливаемая в АРМ-Климат, позволяет специалистам авиаметеорологических центров (АМЦ) использовать для метеорологического обеспечения полетов не только текущие метеоданные, полученные от АМИИС типа АМИС-РФ, но и сведения о годовом и суточном ходе любого параметра погоды, о его повторяемости за любой период времени (Данилова, 2008).

Следует особо отметить такую особенность системы АРМ-Климат, как наличие модификации системы, позволяющей собирать, хранить и обрабатывать на одном АРМ данные нескольких аэродромов (загруженные в единую базу данных). Такая модификация системы, ориентированная на использование в крупных АМЦ, позволяет решать задачи климатического обслуживания малых аэродромов и посадочных площадок, не имеющих собственного персонала для выполнения таких работ.

Рассмотренные алгоритмы, программно-аппаратные комплексы и архивы климатической информации на электронных носителях могут найти применение и в других, помимо гражданской авиации, областях народного хозяйства, в частности для оценки влияния изменения климата на продуктивность сельского хозяйства в различных регионах России (Павлова, Сиротенко, 2012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Руководящий документ (2007). Требования к составлению климатического описания аэродрома. РД 52.21.692—2007. — М. 36 с.

*Персин С. М., Анискин Л. В., Медведев Д. Н. (2012).* Состояние и тенденции развития аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем // Труды ГГО. Вып. 565. С. 257—262.

*Данилова А. Н. (2008).* Анализ метеорологического обеспечения полетов на территории Ханты-Мансийского округа Югра // Метеоспектр. Вып. 1. С. 113—117.

*Павлова В. Н., Сиротенко О. Д. (2012).* Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России // Труды ГГО. Вып. 565. С.132—151.

*Маховер З. М. (1983).* Методические указания по составлению климатической характеристики аэродрома. — Л.: Гидрометеиздат. 48 с.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ВОДОСОДЕРЖАЩЕГО СЛОЯ ДОРОЖНЫМ ДАТЧИКОМ

*П. С. Зименков*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: pavel\_zimenkov@mail.ru

Поступила в редакцию 6.08.2012  
Поступила после доработки 8.10.2012

Мониторинг окружающей среды с целью обеспечения безопасности движения транспортных средств является актуальной задачей, что подтверждается созданием документов общероссийского (Распоряжение Федерального дорожного агентства № 499-р, 2009) и регионального значения. Отличительной особенностью систем мониторинга такого назначения является необходимость наблюдений за состоянием дорожной поверхности. Такие наблюдения выполняются при помощи специализированных дорожных датчиков. Одним из важнейших измеряемых датчиком параметров является толщина слоя. Имея данные о толщине слоя, можно оценить затраты на удаление или предотвращение образования льда. Кроме того, толщина слоя влияет на сцепление колес с дорожной поверхностью (*Haavasoja T.*).

В России получили распространение дорожные датчики фирмы Vaisala (типа DRS511 и DSC111) и фирмы Lufft (типа RS31 и IRS31). Все перечисленные датчики измеряют толщину слоя на дорожной поверхности. Датчики DRS511 и DSC111 измеряют толщину оптическими способами, а датчики ARS31 и IRS31 определяют параметры слоя по специальному алгоритму по электрическим характеристикам.

В опубликованной ранее работе автора (Зименков, 2009) был описан способ измерения толщины токопроводящего слоя с помощью двух сенсоров импеданса с различными расстояниями между электродами. Описанный способ является аналогом способа опре-

деления толщины слоя, который основан на выделении емкостных составляющих из полных импедансов двух сенсоров с различными геометрическими размерами. Аналогичный способ описан в патенте (Weinstein, 2001). В упомянутой работе автора была представлена система уравнений, решением которой является искомая толщина. В качестве известного параметра использовалась функция зависимости импеданса от толщины слоя (далее функция), определенная индивидуальной калибровкой для каждого сенсора.

Представленная ниже работа направлена на теоретическое обоснование рабочей функции. Решение этой задачи позволит исключить калибровку в технологическом цикле изготовления дорожных датчиков с новыми геометрическими размерами сенсоров.

Прием определения зависимости состоит в построении и математическом описании модели прохождения электрического тока в слое водной смеси. Недостатком такого приема является сложность построения полной модели. В условиях мешающих факторов, например таких как неоднородность анализируемого слоя по составу и толщине, разумно создать упрощенную модель (рис. 1).

Предлагаемая модель пренебрегает следующими особенностями и явлениями:

- линиями электрического тока с внешней стороны электродов,
- более сложные линии электрического тока заменены эллиптическими дугами,
- поверхностной проводимостью,
- поляризацией электродов.

Для математического описания предлагаемой модели общую картину линий электрического тока в исследуемом слое следует разделить на области с однотипными линиями (рис. 2):

$O_1$  — однородная область, в которой линии тока над электродом представлены эллиптическими дугами (четверть эллипса в плоскости  $yOx$ ) с одинаковыми соотношениями радиусов, линии между электродами — горизонтальными прямыми в плоскости  $yOx$ ; каждая линия от одного электрода до другого лежит в одной плоскости;

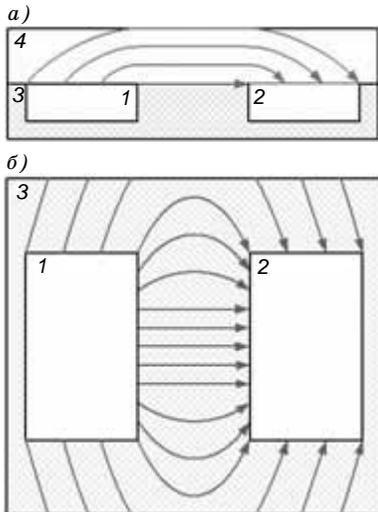


Рис. 1. Упрощенная модель линий электрического тока в исследуемом слое.  
 1, 2 — электроды; 3 — диэлектрик; 4 — контактирующий слой.  
 а — вид сбоку, б — вид сверху.

$O_2$  — область с проявлением краевого эффекта на расстоянии менее половины расстояния между электродами, в которой линии тока над электродом представлены эллиптическими дугами (четверть эллипса в плоскости  $yOx$ ) с изменяющимися соотношениями радиусов вдоль оси  $z$  (за счет сужения области), линии между электродами — эллиптическими дугами (половина эллипса в плоскости  $zOx$ );

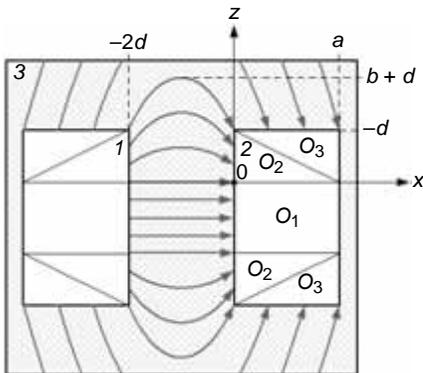


Рис. 2. Однотипные области.  
 Усл. обозначения см. рис. 1.

$O_3$  — область с проявлением краевого эффекта на торцах электродов, в которой линии тока над электродом представлены эллиптическими дугами (четверть эллипса в плоскости  $yOz$ ) с изменяющимися соотношениями радиусов вдоль оси  $x$  (за счет сужения области), линии между электродами — эллиптическими дугами (половина эллипса в плоскости  $zOx$ ).

Проводимость ( $G$ ) слоя между электродами (параллельное соединение) описывается следующей формулой:

$$G = G_1 + 2G_2 + 2G_3, \quad (1)$$

где  $G_i$  — распределенная проводимость слоя между областями  $O_i$  электродов 1 и 2.

Для каждой области с применением математического анализа определены формулы зависимости проводимости от геометрии чувствительной поверхности и толщины исследуемого слоя. В формулах приняты следующие обозначения:

$\sigma$  — удельная проводимость вещества слоя;

$a$  — ширина электродов;

$b$  — расстояние от торца электрода, до которого распространяются линии тока от внутренних сторон электродов;

$c$  — длина электродов;

$d$  — половина расстояния между электродами;

$k_i$  — компенсационный коэффициент, учитывающий преобразование сечения для эллиптических дуг над электродами;

$kd_i$  — компенсационный коэффициент, учитывающий преобразование сечения для эллиптических дуг между электродами и вне электродов;

$l_i(r)$  — длина линии электрического тока над электродом;

$ld_i(r)$  — половина длины линии электрического тока между электродами и вне электродов;

$r, t$  — параметры;

$H$  — высота слоя.

Эллиптические дуги в параметрическом выражении описываются формулами:

$$\begin{cases} x = rA \cos(t), \\ y = rB \sin(t). \end{cases} \quad (2)$$

В дифференциальном виде проводимость слоя описывается выражением:

$$dG = \sigma \frac{dS}{l}. \quad (3)$$

Введя компенсационный коэффициент  $k$ , преобразующий длину дуги переменного сечения  $dS$  в эквивалентную длину постоянного сечения, и интегрируя по поверхности электрода ( $i$ -й области), получим:

$$G = \sigma \iint \frac{dS}{\int k_i dl_i}. \quad (4)$$

### 1. Область $O_1$ .

Линии тока в области  $O_1$  представлены на рис. 3.

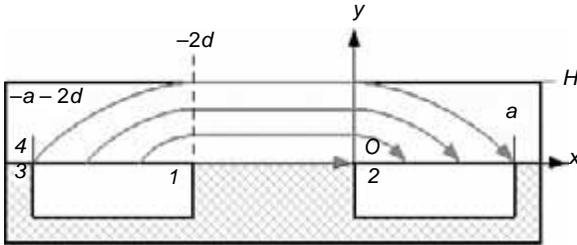


Рис. 3. Линии тока в области  $O_1$ .

Усл. обозначения см. рис. 1.

Искомые параметры области  $O_1$  описываются следующими формулами:

длина дуги (над электродом):

$$l_1(r) = r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{H^2 \cos^2(t) + a^2 \sin^2(t)} dt, \quad (5)$$

компенсационный коэффициент (над электродом)  $k_1$  в параметрическом виде

$$k_1 = \frac{H}{\sqrt{a^2 \cos^2(t) + H^2 \sin^2(t)}}, \quad (6)$$

электропроводность слоя

$$G_1 = (c - 2d)\sigma H \int_0^1 \frac{dr}{2d + 2rH \int_0^{\pi/2} \frac{H^2 \cos^2(t) + a^2 \sin^2(t)}{\sqrt{a^2 \cos^2(t) + H^2 \sin^2(t)}} dt}. \quad (7)$$

## 2. Область $O_2$ .

Линии тока в области  $O_2$  представлены на рис. 4.

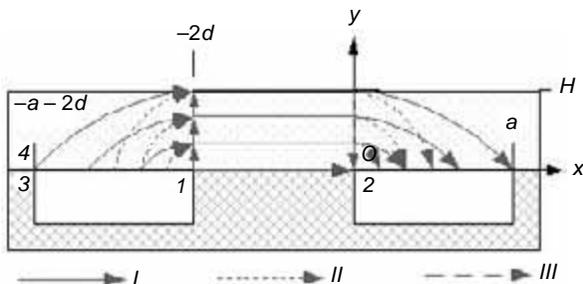


Рис. 4. Линии тока в области  $O_2$ .

$I$  — линии при  $z = 0$ ,  $II$  — линии при  $z = d/2$ ,  
 $III$  — линии при  $z = d$  (вертикальные у краев электродов).

Усл. обозначения 1—4 см. рис. 1.

Согласно рис. 2 уравнение границы имеет вид

$$x(z) = a - \frac{a}{d} z. \quad (8)$$

Искомые параметры области  $O_2$  описываются следующими выражениями:

длина дуги над электродом

$$l_2(r) = r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{H^2 \cos^2(t) + x(z)^2 \sin^2(t)} dt, \quad (9)$$

компенсационный коэффициент над электродом  $k_2$  в параметрическом виде

$$k_2 = \frac{H}{\sqrt{x(z)^2 \cos^2(t) + H^2 \sin^2(t)}}, \quad (10)$$

длина дуги между электродами

$$ld_2(z) = 2 \int_0^{\pi/2} \sqrt{\left(\frac{b}{d} z\right)^2 \cos^2(t) + d^2 \sin^2(t)} dt, \quad (11)$$

компенсационный коэффициент между электродами  $kd_2$  в параметрическом виде

$$kd_2 = \frac{1}{1 + \frac{b}{d} \sin(t)}, \quad (12)$$

электропроводность слоя

$$G_2 = \sigma H \int_0^d \int_0^1 \frac{dr dz}{2 \int_0^{\pi/2} \frac{\sqrt{\left(\frac{zb}{d}\right)^2 \cos^2(t) + d^2 \sin^2(t)}}{1 + \frac{b}{d} \sin(t)} dt + 2rH \int_0^{\pi/2} \frac{\sqrt{H^2 \cos^2(t) + \left(a - \frac{a}{d} z\right)^2 \sin^2(t)}}{\left(a - \frac{a}{d} z\right)^2 \cos^2(t) + H^2 \sin^2(t)} dt}. \quad (13)$$

### 3. Область $O_3$ .

Линии тока в области  $O_3$  представлены на рис. 5.

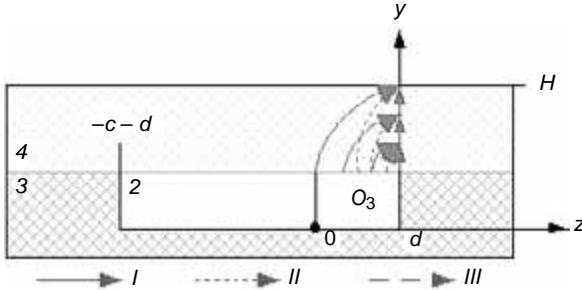


Рис. 5. Линии тока в области  $O_3$ .

$I$  — линии при  $x = a$ ,  $II$  — линии при  $x = a/2$ ,  
 $III$  — линии при  $x = 0$  (вертикальные у краев электродов).

Усл. обозначения 1—4 см. рис. 1.

Согласно рис. 2 уравнение границы имеет вид

$$z(x) = d - \frac{d}{a}x. \quad (14)$$

Искомые параметры области  $O_3$  описываются следующими выражениями:

длина дуги над электродом

$$l_3(r) = r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{H^2 \cos^2(t) + (d - z(x))^2 \sin^2(t)} dt, \quad (15)$$

компенсационный коэффициент над электродом  $k_3$  в параметрическом виде

$$k_3 = \frac{H}{\sqrt{(d - z(x))^2 \cos^2(t) + H^2 \sin^2(t)}}, \quad (16)$$

длина дуги вне электродов

$$ld_3(z) = 2 \int_0^{\pi/2} \sqrt{\left(b + \frac{b}{d}x\right)^2 \cos^2(t) + (d+x)^2 \sin^2(t)} dt, \quad (17)$$

компенсационный коэффициент вне электродов  $kd_3$  в параметрическом виде

$$kd_3 = \frac{d}{\sqrt{d^2 \cos^2(t) + b^2 \sin^2(t)}}, \quad (18)$$

электропроводность слоя

$$G_3 = \sigma H \times \int_0^a \int_0^1 \frac{dr dx}{2d \int_0^{\pi/2} \sqrt{\left(b + \frac{b}{d}x\right)^2 \cos^2(t) + (d+x)^2 \sin^2(t)} dt + 2rH \int_0^{\pi/2} \frac{\sqrt{H^2 \cos^2(t) + \left(\frac{d}{a}x\right)^2 \sin^2(t)}}{\left(\frac{d}{a}x\right)^2 \cos^2(t) + H^2 \sin^2(t)} dt}. \quad (19)$$

На практике измерения проводимости сенсора с водосодержащим слоем следует проводить на переменном токе для исключения дополнительной погрешности, вызванной окислительно-восстановительной реакцией на электродах. Измерения на переменном токе сопровождаются понижением полного импеданса за счет наличия емкостной составляющей, вычисление которой в предлагаемой модели не производится. Однако построение измерительного канала импеданса на базе специализированного конвертера AD5934, позволяющего измерять импеданс и фазовый угол, дает возможность исключать вклад емкостной составляющей.

Построенное описание позволяет определить индивидуальную функцию для параллельных электродов любых линейных размеров. На рис. 6 приведены зависимости проводимости сенсоров от толщины слоя для сенсоров изготовленного образца дорожного датчика со следующими линейными размерами:  $a = 3$  мм,  $c = 55$  мм; область прохождения тока принята равной трем расстояниям между электродами, удельная проводимость  $\sigma$  — равной 1 См/мм.

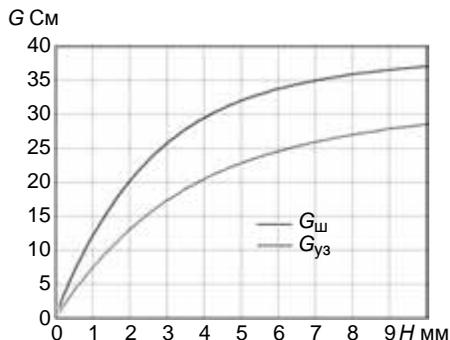


Рис. 6. Зависимость проводимостей сенсоров от толщины слоя  $H$  для расстояния между электродами 3 мм ( $G_{уз}$ ) и 6 мм ( $G_{ш}$ ).

Расчеты выполнены в среде Mathcad 8.

Отношение указанных функций определяет взаимосвязь отношения проводимостей (импедансов) с толщиной слоя (рис. 7).

В табл. 1 приведены результаты натурных испытаний измерения толщины слоя воды дорожным датчиком с использованием в расчетах описанной выше модели.

Результаты испытаний показали высокую точность модели при принятых допущениях при толщине слоя до 1 мм.



Рис. 7. Зависимость отношения проводимостей сенсоров с расстоянием между электродами 3 мм ( $G_{уз}$ ) и 6 мм ( $G_{ш}$ ) от толщины слоя  $H$ .

Таблица 1

Толщина слоя, мм		Погрешность, мм
заданная	измеренная	
0,5	0,5	0,0
0,9	0,9	0,0
1,3	1,7	0,4
1,6	1,9	0,3
2,0	2,3	0,3
2,7	3,4	0,7
3,0	4,0	1,0

Таким образом, решена задача теоретического расчета зависимости отношения проводимостей сенсоров от толщины слоя, подтвержденная натурными испытаниями. Найденные зависимости проводимости сенсоров позволяют оценить влияние погрешности измерений импеданса, а также влияние отклонения положения чувствительной поверхности датчика от горизонтального на точность измерения толщины слоя. Все это позволяет определить требования к точности измерительного канала импеданса и требования к установке датчика.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зименков П. С. (2009). Исследование датчика гололедно-изморозевых отложений // Труды ГГО. Вып. 560. С. 268—276.

Распоряжение Федерального дорожного агентства от 26 ноября 2009 г. № 499-р «Об издании и применении ОДМ 218.8.001—2009 «Методические рекомендации по специализированному гидрометеорологическому обеспечению дорожного хозяйства» [Электронный ресурс] URL: <http://bestpravou.ru/rossijskoje/xd-pravila/d6k/index.htm> (дата обращения 02.08.2012).

Weinstein L. M. Пат. US 6239601 B1. Thickness measurement device for ice or ice mixed with water or other liquid. May 29, 2001 [Электронный ресурс] URL: <http://patentsbase.com/items/US-6239601-B1-thickness-measurement-device-for-ice-or-ice-mixed-with-water-or-other-liquid> (дата обращения 02.08.2012).

Haavasoja T., Haavisto V., Turunen M. J., Nylander P. A field trial of a vehicle's grip compared with RWS data [Электронный ресурс] URL: <http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=Taisto+Haavasoja%2C+Ville+Haavisto&source=web&cd=1&ved=0CFAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iac.ethz.ch%2Fstaff%2Fwueest%2Fsirwec%2Fconferences%2Fsapporo2002%2Fhaavisto.pdf&ei=c14aUIKjOM7P4QSl4HwBA&usg=AFQjCNEUDL4LgfU4hg5R2fHSWjSnwkszvQ> (дата обращения 02.08.2012).

## **ТЕХНОЛОГИЯ ОЦИФРОВКИ ДАННЫХ С БУМАЖНЫХ НОСИТЕЛЕЙ**

*В. М. Шаймарданов, А. Е. Колесников*

Всероссийский научно-исследовательский институт  
гидрометеорологической информации — Мировой центр данных  
249039 Обнинск, ул. Королева, 6  
E-mail: vlad@meteo.ru

Поступила в редакцию 9.06.2012

Основной способ работы с информацией, находящейся на бумажных носителях, предполагает выполнение традиционных рутинных действий по поиску документов в библиотечных каталожных системах. В случае если искомый документ найден, он может быть получен на руки или с него делается бумажная копия для выдачи.

Хранение данных на бумажных носителях, особенно обслуживание ими потребителей, является достаточно трудоемкой и ресурсозатратной деятельностью. Доступ к такой информации, как правило, затруднен. По истечении определенного периода времени бумажные носители физически изнашиваются, что приводит к их потере. Все это делает задачу переноса информации с бумажных носителей на современные электронные носители крайне актуальной.

В настоящее время во ВНИИГМИ—МЦД поставлена роботизированная библиотека для обеспечения долговременного хранения данных больших объемов и имеются промышленные сканеры, на основе которых развернута технология сканирования информации с бумажных носителей для последующего распознавания и занесения в электронное хранилище. В связи с этим возникли предпосылки для создания технологии массового переноса данных на электронный носитель информации и создания автоматизированной системы их долговременного хранения (Шаймарданов, 2011а; Шаймарданов и др., 2007).

Преимущества работы с электронными архивами очевидны, поэтому все данные целесообразно переводить в электронный вид.

Таким образом, решается несколько задач:

- 1) сокращается время доступа к информации;
- 2) обеспечивается физическая сохранность документов, так как необходимость доступа к бумажным документам сокращается;
- 3) обеспечивается организация технологии по распознаванию (оцифровке информации);
- 4) обеспечивается возможность одновременного доступа широкого круга пользователей к одному и тому же документу;
- 5) появляется возможность автоматизированного учета, администрирования, пополнения и использования данных.

В процессе создания электронного архива необходимо выполнить несколько основных операций:

- сканирование документов с бумажных носителей,
- распознавание образов,
- запись информации в цифровом виде в роботизированную библиотеку для долговременного хранения (Николаев, 2010; Шаймарданов, 2011).

Необходимо учесть, что возможности применения универсальных алгоритмов и программных средств распознавания символов для задач массовой оцифровки данных, особенно табличных и имеющих нестандартные символы, ограничены. В связи с этим должно предусматриваться создание или приобретение уже созданного специализированного программного обеспечения, применимого для решения таких специфических задач.

В настоящее время организован участок сканирования хранящихся в архиве бумажных документов и развернута технология формирования электронного архива с их образами (Шаймарданов 2011, 2011а). Для этой цели на участке сканирования используются три сканера:

- Элар Сканмакс — высокопроизводительный цветной поточковый сканер для расшитых документов формата А3;
- два сканера Элар Планскан — книжные планетарные сканеры для сшитых документов формата А2: один черно-белый, другой цветной.

Перед сканированием проводится предварительная подготовка документа, а именно формируется индекс документа. Индекс содержит всю необходимую информацию для дальнейшей работы со сканированным документом. Совокупность индексов в дальнейшем является составной частью базы метаданных сканированных документов. Все документы характеризуются следующими общими признаками:

- название документа;
- год образования документа;
- производитель информации (наименование организации, адрес и т. п.).

На основе анализа этих признаков разработана модель данных, позволяющая составить исчерпывающее описание документа. Всего выработано 24 признака (табл. 1).

В процессе организации сканирования необходимо учитывать разнородность данных на бумажных носителях. При загрузке данных в новую среду хранения для них реализуется автоматизированное построение индексов и каталогов.

Поскольку планируется перевести в электронный вид сотни тысяч накопленных документов на бумажных носителях, то для упрощения управления большими объемами информации используется автоматизированная подсистема индексации и каталогизации хранимых данных, которая реализована на базе программного продукта IBM Content Manager on Demand (CMoD). Этот продукт позволяет осуществлять управление образами документов на уровне файлов, производить индексацию, каталогизацию и осуществлять процедуры поиска и выборки необходимых файлов.

За физическое перемещение внутри архивной системы файлов с образами бумажных документов отвечает IBM Tivoli Storage Manager (TSM).

Функциональные возможности CMoD и TSM, а также аппаратные и архитектурные особенности Архивной системы позволили разработать и реализовать технологию пополнения архива образами бумажных документов, а также обеспечить к ним удаленный доступ с возможностью поиска и получения самих образов. Схема технологии представлена на рис. 1.

Таблица 1

## Модель данных

Название поля	Расшифровка содержимого поля
Название документа	Наименование печатного издания (материального носителя с зафиксированной на нем информацией, который имеет реквизиты, позволяющие его идентифицировать)
Вид информации	Принадлежность издания к наукам в области гидрометеорологии и смежным с ней областям
Подвид информации	Принадлежность издания к дисциплинам наук
Авторы/Редакторы	Авторы/Редакторы издания
Страна	Наименование страны, в которой издан документ
Дата издания	Год публикации издания
Дата начала наблюдений	День, месяц, год начала наблюдений
Дата окончания наблюдений	День, месяц, год окончания наблюдений
Район наблюдений	Название территории (физико-географическое/ государственное/ административное)
Способ производства наблюдения	Способы контактного или удаленного зондирования гидросферы или атмосферы Земли
УДК	Номер, присвоенный изданию по Универсальной десятичной классификации
Инвентарный номер	Уникальный номер издания в хранилище
Авторский знак	Условное обозначение фамилии автора или первого слова заглавия (если авторов четыре и более). Авторский знак состоит из первой буквы первого элемента библиографической записи и цифр, соответствующих первым слогам, а иногда и последующим слогам этого элемента

Название поля	Расшифровка содержимого поля
Язык издания	Язык, на котором издан искомый документ
Место издания/Издательство	Город/Наименование издательства
Тип издания	Тип издания (например, справочник, бюллетень, ежегодник, ежемесячник и др)
Число страниц/листов	Число страниц/листов издания
Номер, том, выпуск, серия, часть	Элемент деления (подраздел) издания
Доступ	Класс издания по типу доступности данных (общедоступная информация/информация ограниченного доступа)
Обобщение	Периоды обобщения представленных в издании данных (например, сроки, ежедневные, многолетние и др.)

При разработке технологии учитывалась специфика данных, полученных при оцифровке.

Остановимся на описании технологии пополнения образами бумажных документов Архивной системы.

Работа технологической схемы предполагает четыре этапа:

- получение оцифрованных данных из тематического подразделения,
- контроль целостности и индексация полученных данных,
- загрузка в тестовую среду СМoD,
- загрузка данных в рабочую среду СМoD с созданием резервной копии данных.

*Этап первый. Получение цифровых образов с участка сканирования.*

Информация с бумажных носителей сканируется, затем формируется пакет файлов, который включает:

- PDF-файл с цифровыми образами бумажным документов;
- файл описания, в котором указаны критерии для загрузки и выгрузки PDF-файла.

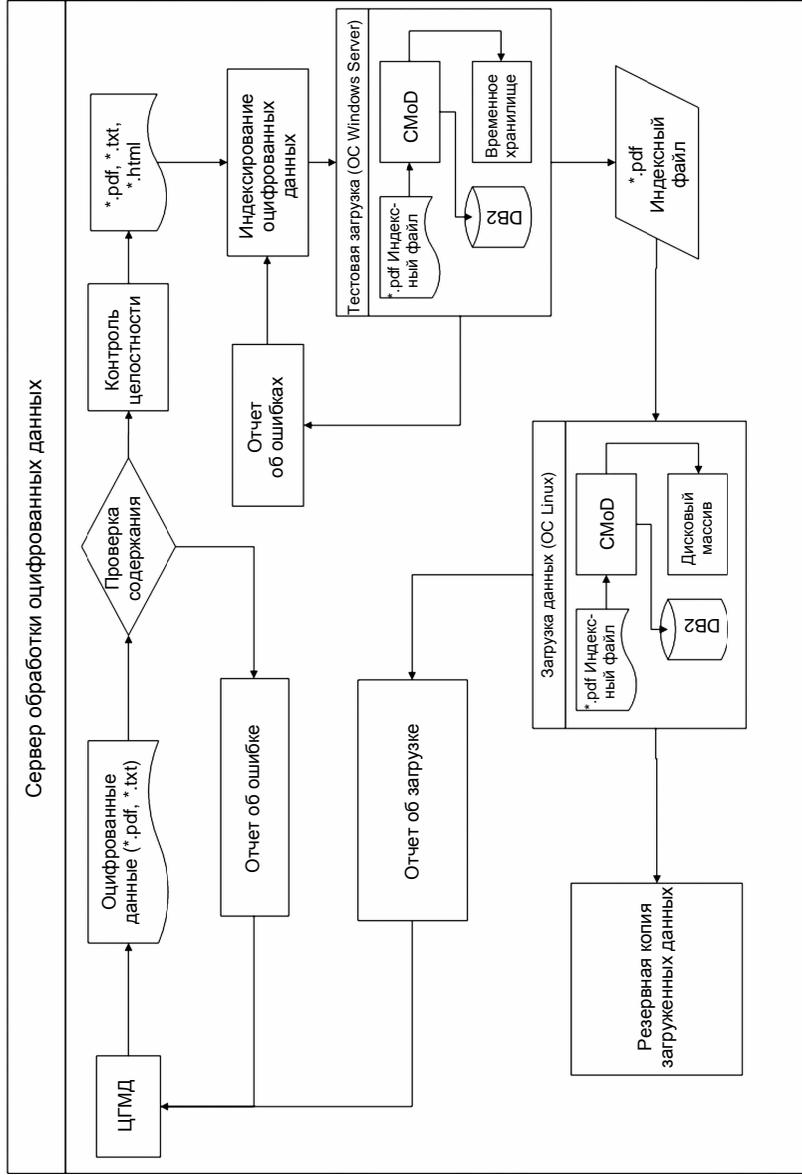


Рис. 1. Технологическая схема пополнения комплекса архивной системы.

Этот пакет файлов копируется во временную директорию, откуда в соответствии с регламентом осуществляется передача данных по локальной вычислительной сети на сервер обработки данных.

*Этап второй. Контроль целостности и индексация полученных данных.*

Для учета контроля целостности и индексации пакетов данных разработано специализированное приложение, которое выполняет следующие функции:

- проверка содержания: проверяется наличие в пакете данных исходного PDF-документа, содержащего образ бумажного носителя и файл описания, имеющий фиксированный набор полей для идентификации PDF-файла до и после загрузки;

- индексация пакетов данных, которая создает структурированный файл, содержащий в себе блоки информации для загрузки данных; каждый блок содержит набор полей таблицы базы данных и соответствующее ему описание конкретного пакета данных;

- создание и рассылка электронных писем; если в момент выполнения какой-либо функции происходит сбой, то программа автоматически создает электронное письмо и отправляет его специалисту.

Результатом работы этого этапа технологии является новый пакет файлов, состоящий из:

- PDF-файлов, полученных при оцифровке бумажных носителей;

- файла с индексами, содержащего информацию для создания описания.

*Этап третий. Загрузка в тестовую среду СМод.*

Пакет файлов, полученный в ходе контроля целостности и индексации, перемещается во временную директорию, откуда будет произведена загрузка в тестовую среду СМод. По расписанию производится запуск скрипта, который осуществляет загрузку пакета файлов в тестовую среду СМод. По окончании работы скрипта формируется отчет о процессе загрузки. На основе отчета о загрузке принимается решение о передаче пакета файлов на следующий этап загрузки.

*Этап четвертый. Загрузка данных в рабочую среду СМoD с созданием их резервной копии.*

В результате работ на предыдущих этапах пакет файлов помещается во временную директорию, откуда производится его дальнейшая загрузка в ленточную роботизированную библиотеку. Процесс загрузки в библиотеку аналогичен процессу загрузки в тестовую среду. По окончании формируется отчет о проведенной загрузке. Копия отчета и уведомление пересылаются в подразделение, где проходит сканирование бумажных документов в формате электронного письма. К письму также прикрепляется список данных, необходимых для резервного копирования. Согласно сформированному списку резервного копирования в тематическом подразделении формируются пакеты файлов, состоящих из:

- изображений, полученных в ходе оцифровки бумажного носителя;
- файла описания.

Каждый набор файлов помещается в директорию, именем которой является инвентарный номер оцифрованного бумажного документа. По завершении комплектования директории файлами данных средствами TSM производится их запись в роботизированную ленточную библиотеку с целью создания резервной копии.

Как только образы бумажных документов попадают в среду СМoD, они становятся автоматически доступными практически любому пользователю посредством стандартного Web-браузера.

Для обеспечения доступа к образам документов разработаны специализированные программные средства локального и удаленного доступа на базе СМoD с возможностью поиска. Эти программные средства представляют собой Web-технология, разработанную на объектно-ориентированном языке JAVA, которая включает:

- авторизацию пользователя,
- структурирование поисковых разделов,
- ввод поисковых критериев,
- выборку и подготовку результатов поиска,

- вывод результатов поиска с возможностью сортировки отображения количества результатов на странице вывода,
- выгрузку файлов в образах бумажных документов на локальный диск пользователя.

На рис. 2 представлена блок-схема реализованного алгоритма прохождения запроса пользователя для получения данных.

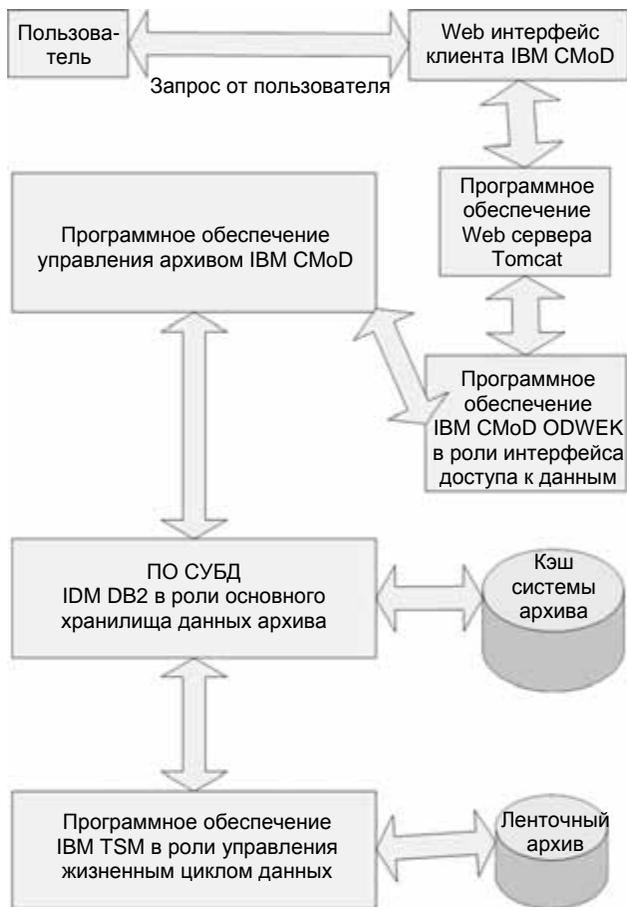


Рис. 2. Блок-схема поиска файлов с образами по запросам.

Поиск можно осуществлять по пяти основным полям или использовать расширенный поиск по 30 полям. После заполнения полей информацией, необходимой для поиска, средствами СМoD производят выборку файлов с образами, которые соответствуют заданным критериям. После выборки пользователь получает список подходящих документов и одним «кликом» может загрузить весь документ на свой локальный диск или в соответствующее приложение.

Для каждого отсканированного бумажного носителя формируется свой отдельный индекс, содержащий все описания бумажного носителя согласно выработанной модели данных. Далее отсканированный носитель и его индекс формируют «пакет данных», который передается системе Content Manager on Demand для загрузки в роботизированную библиотеку при помощи программного интерфейса TSM.

Оригиналы объектов хранения находятся на выделенном пуле картриджей, копия объектов хранения — во временном хранилище на сервере Content Manager on Demand. Данные во временном хранилище имеют свой жизненный цикл, который составляет пять дней. Данные, хранящиеся на картриджах в роботизированной библиотеке, имеют неограниченный жизненный цикл. Однако существует еще одна копия данных, которая загружается методом архивации в роботизированную библиотеку средствами TSM. Данная копия является резервной на случай потери данных системой Content Manager on Demand.

Для поиска данных необходимо создание автоматизированного каталога фонда, в котором указываются состав и место размещения на носителях с привязкой к месту хранения информации. Используя эти средства, можно определить наличие данных и подготавливать необходимую информацию для извлечения их из фонда.

На базе программного продукта Content Manager on Demand Web Enablement Kit и средств современных Web-технологий реализована система поиска отсканированных носителей в роботизированной библиотеке.

Для минимизации результатов поиска используется двухзвенная система поиска. Первое звено позволяет группировать

все объекты хранения по принадлежности к наукам и дисциплинам наук в области гидрометеорологии и смежных с ней областей. Второе звено позволяет указать конкретные поисковые критерии. Взятая за основу поисковых критериев модель описания данных была разбита на две группы критериев:

- критерии для поиска описания объекта,
- критерии для поиска описания содержания объекта.

Система поиска имеет прозрачный интерфейс работы с пользователем и содержит всплывающие подсказки и выпадающие блоки с дополнительной информацией.

После формирования поискового запроса пользователю выдается весь перечень объектов хранения, удовлетворяющий его запросу. Результат поиска можно группировать по числу выведенных объектов хранения. Для каждого результата имеется отдельная кнопка получения объекта хранения, при нажатии на которую происходит проверка наличия запрашиваемого объекта во временном хранилище Content Manager on Demand с последующей передачей его пользователю. В случае отсутствия объекта хранения во временном хранилище организуется выгрузка копии объекта из роботизированной библиотеки и помещение ее во временное хранилище с установкой жизненного цикла для копии. Таким образом минимизируется нагрузка на роботизированную библиотеку независимо от числа пользователей, осуществляющих поиск и выгрузку необходимой информации.

Описанная выше технология не решает в полном объеме проблемы автоматизированной обработки данных с бумажных документов, а только улучшает их сохранность и доступность.

Дальнейшее увеличение объема распознавания цифровых образов позволит вовлечь в автоматизированную обработку на ЭВМ значительную часть фонда данных, которая на сегодняшний день недоступна.

К сожалению, пока не существует программных средств, которые позволили бы переводить все типы данных с бумажных документов в символьный вид, поэтому неизбежно применение оцифровки путем ручной набивки данных. В первую очередь, это относится к рукописным или печатным документам, полученным на алфавитно-цифровых печатающих устройствах (АЦПУ).

Несмотря на это, часть данных в цифровых образах необходимо и возможно переводить в символьный вид с помощью стандартных средств оптического распознавания (OCR).

С каждым годом средства оптического распознавания развиваются и получают все более совершенные алгоритмы. На сегодняшний день можно говорить о том, что средства распознавания печатного текста работают с высокой степенью точности. Кроме того, в последнее время получили развитие алгоритмы распознавания данных, представленных в табличном виде.

Однако стоит отметить, что, несмотря на высокое качество алгоритмов распознавания, полученные в результате оцифровки данные требуют дополнительной проверки для подтверждения их достоверности. Это можно сделать, например, с помощью программного обеспечения статистической обработки SAS.

Несмотря на наличие технологии оцифровки и пополнения архивной системы образами бумажных документов, традиционное ручное обслуживание сохранится до перевода данных со всех бумажных носителей в электронный вид.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Николаев Е. А., Шаймарданов В. М.* (2010). Развитие архивной системы Росгидромета // Труды ВНИИГМИ—МЦД. Вып. 174. С. 3—10.

*Шаймарданов В. М.* (2011). Обеспечение сохранности данных, накопленных на бумажных носителях и организация обслуживания // Труды ГГО. Вып. 563. С. 191—196.

*Шаймарданов В. М.* (2011а). Создание программно-аппаратного комплекса долговременного хранения и использования гидрометеорологической информации // Ученые записки Российского государственного университета. № 21. С. 118—125.

*Шаймарданов М. З., Веселов В. М., Стерин А. М., Шаймарданов В. М.* (2007). Концепция модернизации архивной системы Мирового метеорологического центра // Труды ВНИИГМИ—МЦД. Вып. 172. С. 3—37.

## **ВЛИЯНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДАХ РОССИИ**

*А. Ф. Ануфриева, И. В. Смирнова*

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

Поступила в редакцию 17.02.2012  
Поступила после доработки 7.10.2012

### **Введение**

Основной вклад в уровень загрязнения атмосферного воздуха вносят выбросы промышленных предприятий и автотранспорта. Уровень загрязнения формируется в результате непрерывно протекающих в атмосфере фотохимических реакций окисления и восстановления, сопровождающихся образованием новых веществ. Рассеяние и накопление примесей в атмосфере в значительной степени определяются метеорологическими условиями. (Безуглая и др., 2008).

Особый интерес представляет изменение концентрации загрязняющих веществ в воздухе в периоды аномальных погодных условий, которые сформировались на Европейской части России в летний период 1972, 2002 и 2010 гг. В эти годы летом отмечались значительное повышение температуры воздуха, дефицит осадков и слабый ветер. Многочисленные лесные и торфяные пожары привели к увеличению концентрации вредных веществ повсеместно, в том числе и во всех крупных городах, в три-четыре раза.

В 1972 г. на европейской части России (ЕЧР) преобладала погода антициклонического типа с устойчивой стратификацией нижнего слоя тропосферы в ночное время. Повторяемость неблагоприятных условий, характеризующихся слабым ветром и

уменьшением суммы осадков, возросла почти в два раза по сравнению с 1971 г., увеличилось число дней со мглой.

В Поволжье, центральных районах и на северо-западе ЕЧР температура воздуха в июле была на 5—6 °С выше нормы. В Москве средняя месячная температура составила 23 °С, а осадков выпало 16 мм (при норме 79 мм). В августе жара и дефицит осадков сохранились, температура воздуха была на 4—6 °С выше нормы. В Саратове и Казани за август выпало лишь 2—4 % месячной нормы осадков, в центральных и северо-западных районах ЕЧР и Приуралье — 15—45 % нормы (Обзор, 1972).

Подобные условия возникали и в июле—августе 2002 г. Подробный анализ загрязнения атмосферного воздуха в этот период представлен в работе Безуглой и др. (2008). В городах Нижегородской области максимальные значения концентрации взвешенных веществ, оксида углерода, формальдегида превышали установленные значения максимальной разовой предельно допустимой концентрации (ПДК<sub>м.р.</sub>) в 2—7 раз. В городах Московской области концентрации диоксида азота и бенз(а)пирена возросли в 4—8 раз, взвешенных веществ — в 1,4—3,6 раза. В Санкт-Петербурге средние за месяц концентрации взвешенных веществ, оксида углерода, формальдегида и ксилола по сравнению с 2001 г. возросли в 2—5 раз, максимальные разовые концентрации взвешенных веществ и оксида углерода — в 3,7—5,4 раза, толуола и бензола — в 6—8 раз.

Ситуация, возникшая на территории европейской части России летом 2010 г., как и в аналогичных случаях в предшествующий период, привела к формированию аномального уровня загрязнения воздуха.

### **Влияние погодных условий и пожаров на формирование уровня загрязнения воздуха в 2010 г.**

Большую часть лета 2010 г. над европейской частью России, как и в 1972 и 2002 гг., располагался мощный малоподвижный антициклон, высота которого достигала 12 км. Температура воздуха в России превысила климатическую норму на 1,8 °С (Док-

лад, 2011). За период наблюдений с 1936 г. это было самое теплое лето. В июле температура воздуха была выше нормы на 5,8 °С, в августе — почти 4,0 °С. Особенно высокая температура была отмечена в районе Центрально-Черноземных областей (на 7,0—11,0 °С выше нормы). В Москве был зафиксирован абсолютный максимум температуры воздуха, составивший 38,2 °С, в Безенчуке, Пензе, Саратове и Тамбове — 40,4—42,5 °С (Мещерская и др., 2011). При этом в Пензенской и Самарской областях, а также в Республике Мордовия, Чувашской и Марийской республиках в июле выпало менее 8 % месячной нормы осадков.

Месячные суммы прямой солнечной радиации летом в Воронежской, Саратовской и Самарской областях, а также в Башкирии превысили норму на 37—40 %.

Сухая погода в сочетании с высокой температурой воздуха привели к засухе и многочисленным лесным и торфяным пожарам практически на всей территории европейской части России. В начале августа на ЕЧР лесными пожарами было охвачено около 200 тыс. га в 20 регионах. Торфяные пожары были зафиксированы в Республиках Мордовия и Татарстан, Белгородской, Владимирской, Воронежской, Ивановской, Кировской, Липецкой, Московской, Нижегородской, Рязанской, Тамбовской, Тульской и Ульяновской областях.

Высокая температура воздуха определила значительное повышение активности химических реакций в атмосфере, что привело к увеличению концентраций вторичных загрязняющих веществ. Усилились образование приземного озона, трансформация оксида азота в диоксид азота и образование конечного продукта в этой цепи преобразований — формальдегида. В соответствии с расчетами Э. Ю. Безуглой (2010) при максимальном значении коэффициента трансформации оксида азота в диоксид азота концентрация диоксида азота может достигать 1—2 ПДК<sub>с.с</sub> (среднесуточная предельно допустимая концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест), а формальдегида — почти 10 ПДК<sub>с.с</sub>. Такие значения концентраций примесей отмечались летом 2010 г. во многих городах европейской части России (см. рис. 1 и 5).

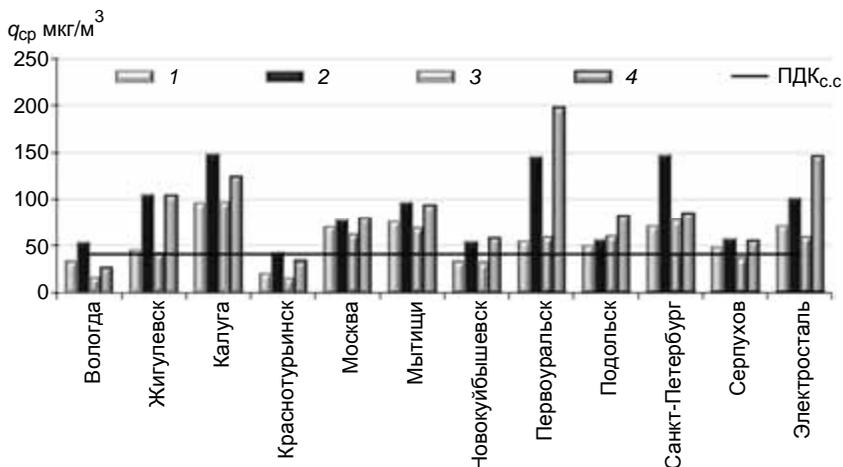


Рис. 1. Средние за месяц значения концентрации диоксида азота ( $q_{cp}$ ) в городах Вологодской, Московской, Калужской, Ленинградской, Свердловской и Самарской областей в июле и августе 2009 и 2010 гг.

1 — июль 2009 г., 2 — июль 2010 г., 3 — август 2009 г., 4 — август 2010 г.

Из табл. 1 следует, что лето 2010 г. по сравнению с летом 2002 г. характеризовалось более высокими температурой воздуха и концентрациями загрязняющих веществ. В 2010 г. максимальные

Таблица 1

**Наибольшие максимальные разовые концентрации примесей ( $q_{max}$ ) и средняя температура воздуха ( $T$  °С), отмеченные в летний период 2002 и 2010 гг.**

Концентрация	2002 г.		2010 г.	
	$q_{max}$	$q_{max}/\text{ПДК}_{м.р}$	$q_{max}$	$q_{max}/\text{ПДК}_{м.р}$
Оксид азота, $\text{мкг}/\text{м}^3$	700	1,8	880	2,2
Диоксид азота, $\text{мкг}/\text{м}^3$	840	4,2	1470	7,4
Формальдегид, $\text{мкг}/\text{м}^3$	67	1,9	457	13,1
Оксид углерода, $\text{мг}/\text{м}^3$	26,6	5,3	44,6	8,9
Бенз(а)пирен, $\text{мкг}/\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$	4	4	5,4	5,4
Температура воздуха, °С	23,5		28,8	

концентрации оксидов азота, оксида углерода и бенз(а)пирена были выше, чем в 2002 г., в 1,3—1,8 раза, а концентрации формальдегида — почти в 7 раз.

В 2010 г. рост концентрации в воздухе загрязняющих веществ в летние месяцы привел к увеличению и среднегодовых значений.

На европейской части России концентрация *диоксида азота* увеличилась в 60 из 133 городов, причем в 44 городах более чем на 20 %. Средняя концентрация в этот период возросла в 1,2—2,5 раза (по сравнению с 2009 г.) и составила в основном 80 мкг/м<sup>3</sup>.

В июле и августе средняя за месяц концентрация диоксида азота в Электростали и Калуге увеличилась в 1,3—2,7 раза и достигла 3—4 ПДК<sub>с.с.</sub>, в Первоуральске возросла в 2,5—3,3 раза и достигла 5 ПДК<sub>с.с.</sub> В большинстве городов Московской области максимальная разовая концентрация диоксида азота увеличилась в 2—4,5 раза.

Для выявления связи между концентрацией диоксида азота и температурой воздуха были рассчитаны изменения температуры ( $\Delta T$ ) и концентрации ( $\Delta q$ ) загрязняющих веществ за летние месяцы 2009 и 2010 гг. Концентрация в июне 2010 г. сравнивалась с концентрацией в июне, июле и августе 2009 г. и т. д. Также вычислялись различия в температуре воздуха. Примеры такой связи для отдельных городов представлены на рис. 2.

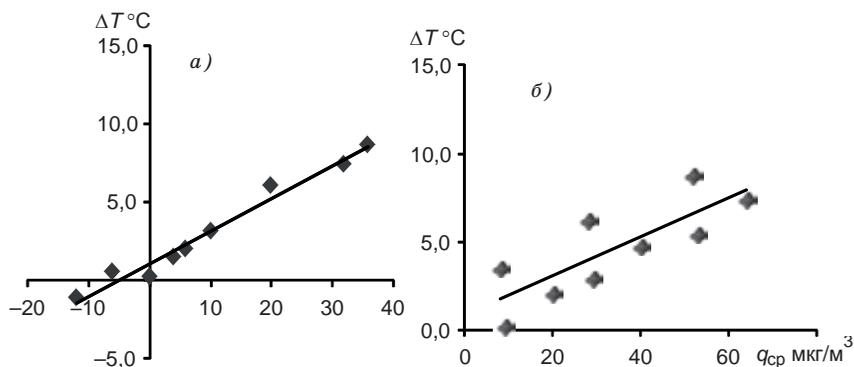


Рис. 2. Связь между изменением концентрации диоксида азота ( $\Delta q$ ) и температуры воздуха ( $\Delta T$ ) в летние месяцы 2009 и 2010 гг.

а — Вологда, б — Калуга.

Далее разности концентраций по данным для пяти городов были пронормированы на среднее значение концентрации летом, и затем была рассмотрена зависимость концентрации диоксида азота от температуры воздуха (рис. 3). Коэффициент корреляции составил 0,60.

Поскольку при возрастании концентрации оксида азота происходит снижение степени трансформации оксида азота в диоксид азота и соответственно уменьшается скорость образования диоксида азота (Безуглая и др., 2008), повышение температуры воздуха не всегда и не во всех городах сопровождается увеличением концентрации диоксида азота до экстремального уровня.

В 2010 г. в городах европейской части России особенно заметным было повышение концентрации *формальдегида*, которое (по сравнению с 2009 г.) было зафиксировано в 48 % городов. В отдельных городах средние за месяц значения концентрации формальдегида в июле—августе по сравнению с 2009 г. увеличились в 2—5 раз (рис. 4).

Особенно заметно средние значения концентрации увеличились в августе (рис. 5). По сравнению с аналогичным периодом 2009 г. в 11 из 31 города концентрации возросли в 2—4 раза, а в Подольске и Сочи — в 5—6 раз.

В работе Э. Ю. Безуглой с соавторами (2012) по данным для 19 городов обнаружена четкая связь между повышением температуры воздуха в летние месяцы и увеличением концентрации формальдегида. При повышении температуры воздуха на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  концентрация формальдегида возрастает на  $2\text{--}4\text{ мкг/м}^3$  при ее уровне менее  $10\text{ мкг/м}^3$  и на  $6\text{--}10\text{ мкг/м}^3$  ее уровне более  $15\text{ мкг/м}^3$ .

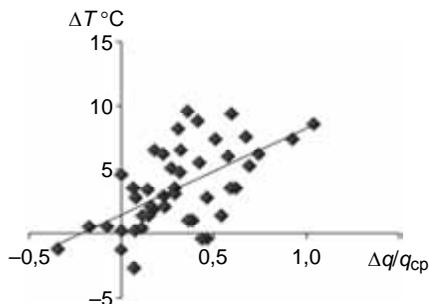


Рис. 3. Связь между изменением концентрации диоксида азота ( $\Delta q/q_{cp}$ ) и изменением температуры воздуха ( $\Delta T$ ) в летние месяцы 2009 и 2010 гг.

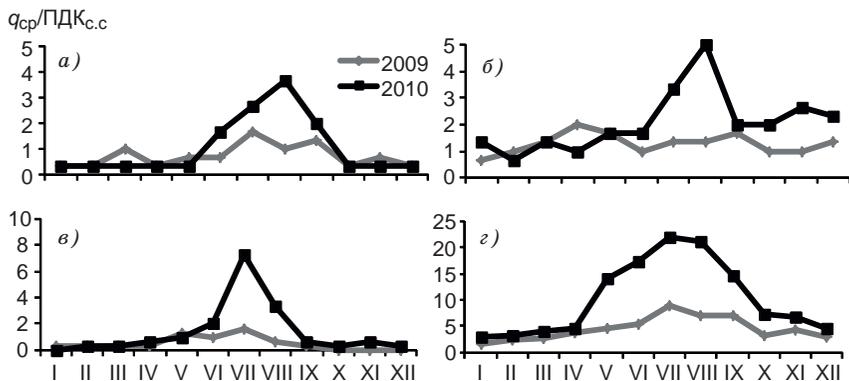


Рис. 4. Годовой ход превышения средними месячными значениями концентрации формальдегида ПДК<sub>с.с</sub> ( $q_{cp} / \text{ПДК}_{с.с}$ ) в 2009 и 2010 гг.  
*a* — Коломна, *б* — Серпухов, *в* — Подольск, *г* — Ясная Поляна.

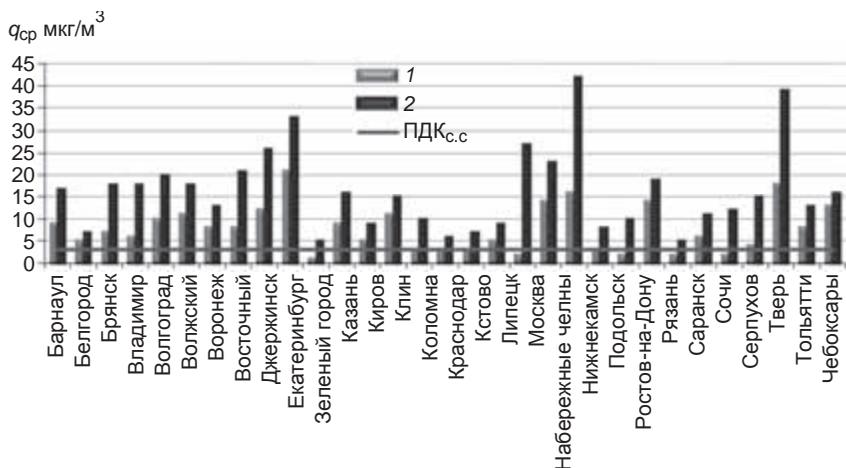


Рис. 5. Средняя месячная концентрация формальдегида ( $q_{cp}$ ) в августе 2009 г. (1) и 2010 г. (2).

На территориях, охваченных пожарами, летом 2010 г. при повышении температуры воздуха на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  концентрация формальдегида увеличилась на  $4\text{--}17\text{ мкг/м}^3$ . Примеры такой связи для отдельных городов приведены на рис. 6.

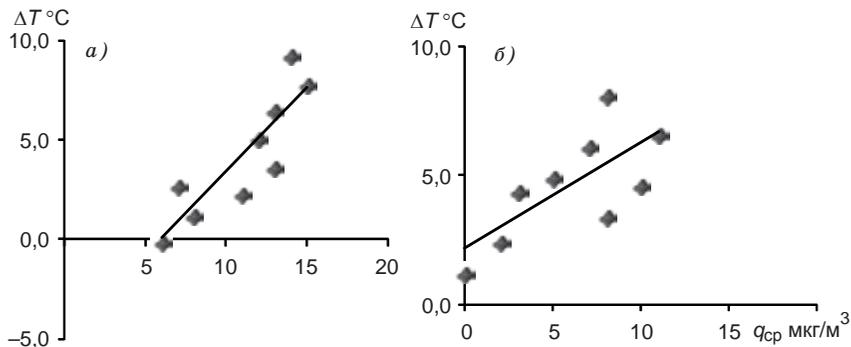


Рис. 6. Связь между изменением концентрации формальдегида ( $\Delta q$ ) и температуры воздуха ( $\Delta T$ ) в летние месяцы 2009 и 2010 гг.

*a* — Владимир, *б* — Брянск.

В условиях аномально жаркой погоды увеличились концентрации *специфических примесей*, сероводорода, фенола, хлорида водорода и др. Например, максимальная разовая концентрация сероводорода в Рязани достигала 13 ПДК. Максимальная концентрация фенола в Москве и Серпухове увеличилась в два раза, хлорида водорода в Щелкове — в 1,5 раза. Средняя концентрация ксилола и толуола в Перми достигла максимума в июле (рис. 7). Изменился и годовой ход концентрации *бенз(а)пирена* (рис. 8).

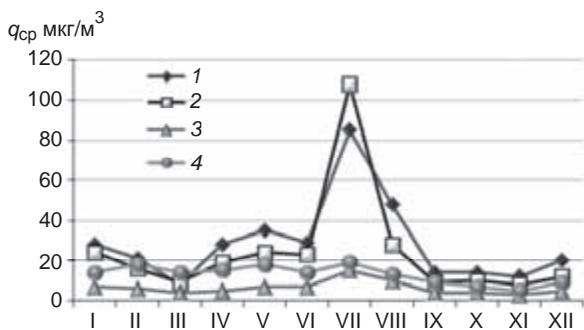


Рис. 7. Годовой ход средней месячной концентрации углеводородов ( $q_{\text{ср}}$ ) в Перми за 2010 г.

*1* — ксилол, *2* — толуол, *3* — этилбензол, *4* — бензол.

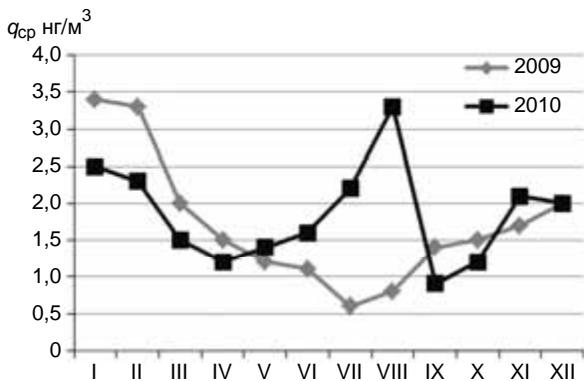


Рис. 8. Годовой ход средней месячной концентрации бенз(а)пирена ( $q_{cp}$ ) в 2009 и 2010 гг. в Коломне.

По сравнению с августом 2009 г. во Владимире, Волгореченске, Коломне, Костроме, Клину, Смоленске, Мытищах и Ясной Поляне концентрации бенз(а)пирена увеличились в 3—5,5 раза (рис. 9).

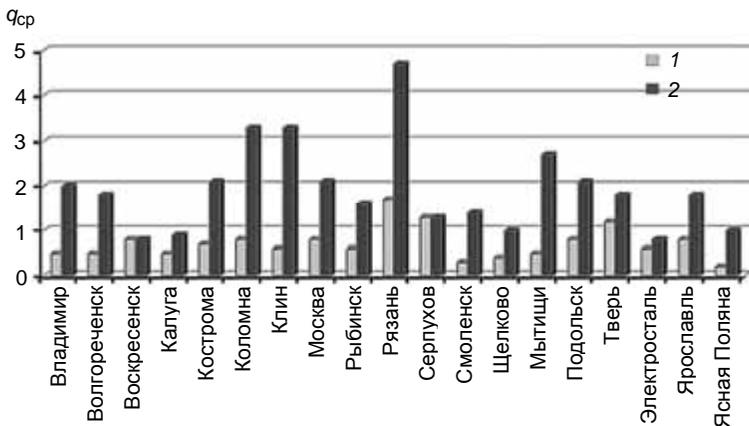


Рис. 9. Средняя месячная концентрация ( $q_{cp}$ ) бенз(а)пирена в городах центра европейской части России в августе 2009 г. (1) и 2010 г. (2).

Концентрации оксида углерода и взвешенных веществ увеличились не так существенно, как концентрации бенз(а)пирена. Максимальные концентрации оксида углерода в Москве и городах Московской и Нижегородской областей возросли до 2—9 ПДК. 8 августа (в период пожаров) в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике было зафиксировано увеличение концентрации *взвешенных веществ* до 3,5 ПДК<sub>с.с.</sub>. В Санкт-Петербурге 9 августа среднесуточная концентрация мелкодисперсной пыли  $PM_{10}$  возросла более чем в восемь раз (рис. 10).

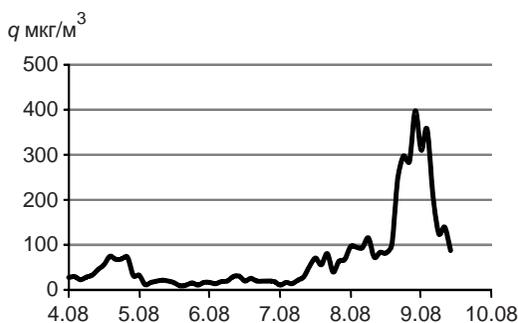


Рис. 10. Изменения среднесуточной концентрации мелкодисперсной пыли  $PM_{10}$  ( $q$ ) в Санкт-Петербурге с 4 по 9 августа 2010 г.

### Заключение

В 1972, 2002 и 2010 гг. в летний период на европейской части России наблюдались схожие синоптические ситуации, обусловленные наличием мощного антициклона. Отмечались значительное повышение температуры воздуха, малое количество осадков и слабый ветер. Эти метеорологические условия способствовали накоплению примесей в атмосферном воздухе.

Анализ данных наблюдений за летние месяцы 2009—2010 гг. показал, что при повышении температуры воздуха на европейской части России на 3,6 °С (в отдельных местах на 7,0—11,0 °С) средняя концентрация диоксида азота в городах возросла в 1,2—2,5 раза, формальдегида — в 2—6 раз.

В городах европейской части России в летний период отмечалось увеличение концентрации бенз(а)пирена до 1—5 ПДК, обусловленное пожарами.

Средняя концентрация оксида углерода, обычно не превышающая ПДК, в результате пожаров увеличилась до 1,1—2,6 ПДК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*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.

*Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. (2008).* Воздух городов и его изменения. — СПб: Астерион. 254 с.

*Безуглая Э. Ю., Загайнова М. С., Ивлева Т. П. (2012).* Возможность оценки высоких концентраций формальдегида при изменении температуры воздуха // Труды ГГО. Вып. 565. С. 89—102.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год (2011). — М., изд. Росгидромета. 66 с.

*Мещерская А. В., Мирвис В. М., Голод М. П. (2011).* Засуха 2010 г. на фоне многолетнего изменения засушливости в основных зерносеющих районах Европейской территории России // Труды ГГО. Вып. 563. С. 94—121.

Обзор состояния загрязнения атмосферы в городах и промышленных центрах Советского Союза за 1972 г. (1973). — Л. 356 с.

**РЕЗУЛЬТАТЫ НЕПРЕРЫВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ  
ЗА КОНЦЕНТРАЦИЕЙ МЕТАНА НА СТАНЦИИ ТИКСИ  
(СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ СУДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ  
НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ)**

*А. И. Решетников, В. М. Ивахов*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: alexr35@mail.ru

Поступила в редакцию 22.02.2012

Поступила после доработки 24.10.2012

В последние годы в России и за рубежом широко дискутируется вопрос о возможном вкладе криолитозоны Арктического региона в формирование полей концентрации метана в атмосфере высоких широт Северного полушария (Westbrook et al., 2009; Shakhova et al., 2010; O'Conner et al., 2010). Наиболее вероятным источником эмиссии считается выделение газообразного метана при разрушении его гидратов (Biaostoch et al., 2011), крупные залежи которых обнаружены на шельфах арктических морей: Лаптева, Новосибирского и Чукотского.

Наблюдения за концентрацией  $\text{CH}_4$  в Арктическом регионе весьма немногочисленны и нерегулярны. Наибольший объем экспериментальных данных в регионе получен в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН группой И. П. Семилетова (Shachova et al., 2010).

В работе Шаховой с соавторами (Shachova et al., 2010) приводятся данные о том, что на шельфе морей восточной части Арктики при измерениях с борта вертолетов и судов наблюдались концентрации метана, превышающие средние фоновые значения на 10 % и более. В отдельных случаях было зафиксировано двух- и даже трехкратное увеличение концентрации метана на уровне наблюдений, которое, по мнению авторов, могло быть связано с наличием фонтанирования метана на отдельных участках маршрутов.

В сентябре 2005 г. была проведена морская экспедиция под руководством И. П. Семилетова. Маршрут исследовательского судна проходил на участке протяженностью более 1000 км вдоль побережья Северного Ледовитого океана — от побережья полуострова Таймыр до устья реки Индигирки (рис. 1).

При анализе представленных на рисунке данных привлекают внимание, прежде всего, чрезвычайно высокие средние значения концентрации метана на участках маршрута в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском ( $2,97 \pm 0,15$  и  $2,66 \pm 0,09$  млн<sup>-1</sup> соответственно). Стоит отметить, что приведенные выше значения на 30—50 % превосходят уровень расчетного морского фона (MBL), полученного на основе данных измерений с различных арктических станций. Более того, в некоторых регионах зафиксированы значения концентрации метана, которые превышают средние значения по маршруту более чем в 2—3 раза. Одной из причин такого высокого уровня средних концентраций метана, наблюдаемого над шельфом морей восточной части Арктики, по мнению авторов

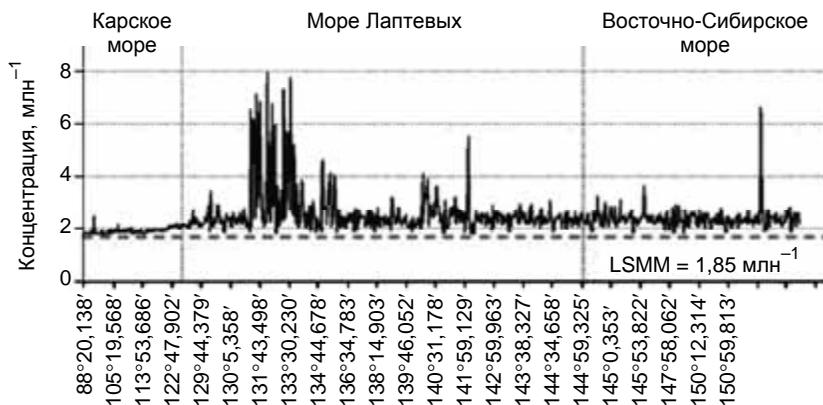


Рис. 1. Данные измерений концентрации (млн<sup>-1</sup>) атмосферного метана, полученные во время морской экспедиции в сентябре 2005 г. (Shakhova, 2010).

Штриховая прямая — среднесуточная концентрация метана (LSMM = 1,85 млн<sup>-1</sup>) на широте станции Барроу.

работы Shakhova et al. (2010), может быть дестабилизация метановых гидратов, обусловленная повышением температуры воды за последнее десятилетие.

В 2007—2008 гг. в рамках программы Международного полярного года концентрация метана измерялась с борта НЭС «Академик Федоров»: в 2007 г. на маршруте Мурманск—о. Шпицберген—Северный полюс, в 2008 г. вдоль побережья Восточной Сибири.

На рис. 2 приведены значения концентрации метана, полученные с конца августа по сентябрь 2008 г. (см. рис. 2 а) и в сентябре 2007 г. (см. рис. 2 б). Результаты измерений, выполненных

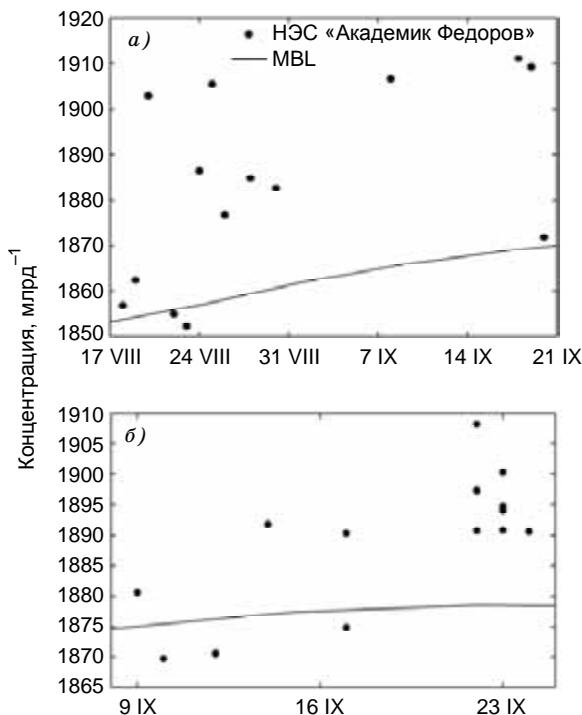


Рис. 2. Концентрация метана, измеренная в период рейса НЭС «Академик Федоров» в 2008 г. (а) и в 2007 г. (б).

в летний период 2008 г., показали повышенные относительно расчетного морского фона значения концентрации метана. Максимальное превышение концентрации метана относительно MBL, составившее более 50 млрд<sup>-1</sup>, зафиксировано 25 августа 2008 г. По данным наблюдений, выполненных в августе—сентябре 2007 г., в районе Северного полюса также наблюдались значения концентрации метана, близкие к максимальным, отмеченным за аналогичный период 2008 г. Максимальное значение концентрации метана в районе Полюса было лишь на 3 млрд<sup>-1</sup> ниже концентраций, зафиксированных у побережья Восточной Сибири в 2008 г., и менее чем на 2 % выше MBL. Результаты измерений концентрации метана в августе—сентябре 2008 г. представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Концентрация метана, измеренная с НЭС «Академик Федоров»  
в августе—сентябре 2008 г.**

Дата отбора пробы	Координаты места отбора пробы		Концентрация, млрд <sup>-1</sup>
	φ° с. ш.	λ° в. д.	
18 авг	68,43	42,53	1856,8
19 авг	69,56	52,02	1862,3
20 авг	72,21	64,23	1903,1
22 авг	73,50	72,20	1854,9
23 авг	73,49	80,38	1852,1
24 авг	76,30	97,30	1886,4
25 авг	77,45	105,23	1905,6
26 авг	77,16	116,12	1876,7
28 авг	76,30	132,42	1884,7
30 авг	76,58	155,41	1882,6
8 сен	73,38	169,31	1906,7
18 сен	70,55	179,00	1911,1
19 сен	77,20	169,35	1909,3
20 сен	82,56	169,09	1871,7

В экспедиции 2008 г. измерения непосредственно на шельфе Восточно-Сибирского моря были выполнены только 25, 26 и 28 августа. Полученные в эти дни значения концентрации метана составили 1905,6, 1876,7 и 1887,5 млрд<sup>-1</sup> соответственно. Превышение над фоном (MBL) и в этом случае составило лишь 1—3 %, что противоречит данным, представленным на рис. 1.

Организованные летом 2010 г. в ГМО «Тикси» (71,66° с. ш., 128,66° в. д.) непрерывные и регулярные фляжечные измерения концентрации метана в настоящее время дают информацию, существенно дополняющую уже существующий объем данных наблюдений.

Результаты измерений ГМО «Тикси» за июль, август и сентябрь 2011 г., когда наблюдались максимальные за год значения концентрации CH<sub>4</sub>, приведены на рис. 3.

Среднемесячные значения концентрации метана составили в июле, августе и сентябре 2011 г. 1909 ± 30, 1959 ± 42 и 1912,7 ± ± 24,2 млрд<sup>-1</sup> соответственно. Амплитуда колебаний среднечасовых значений концентрации доходила до 140 млрд<sup>-1</sup> при максимальном значении 2008 млрд<sup>-1</sup> в июле и примерно до 300 млрд<sup>-1</sup> при максимальном значении 2150 млрд<sup>-1</sup> во второй половине августа, когда отмечались максимальные значения температуры воздуха.

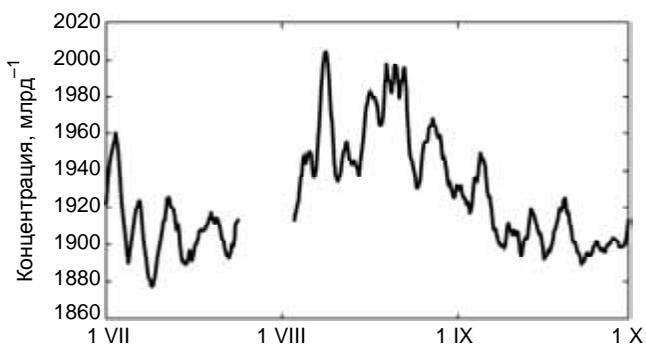


Рис. 3. Концентрация метана по данным наблюдений ГМО «Тикси» в июле—сентябре 2011 г.

На рис. 4 приведены осредненные данные непрерывных измерений концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , полученные с помощью лазерного спектрометра DLT-100.

С июля до середины сентября 2011 г., при переносе воздушных масс из северного сектора, в ГМО «Тикси» наблюдались высокие значения концентрации метана, нередко достигающие  $1950 \text{ млрд}^{-1}$ , а в отдельных случаях превышающие  $2000 \text{ млрд}^{-1}$ . При этом в отличие от данных других полярных станций (Териберка, Кольский п-ов или Паллас, северная Финляндия) максимальные концентрации метана на ГМО «Тикси» отмечались не в зимние месяцы, а в августе — сентябре, т. е. до того как в дельте Ленской губы начал формироваться устойчивый ледяной покров. При этом изменение концентрации  $\text{CO}_2$  происходило традиционно (максимум концентрации наблюдался в январе—феврале).

Накопленные с августа 2010 г. результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана в ГМО «Тикси» дают возможность провести их сопоставление с результатами наблюдений, приведенными в работах Шаховой и др. (2007), Shachova et al. (2010). Необходимо также отметить, что многие из маршрутов,

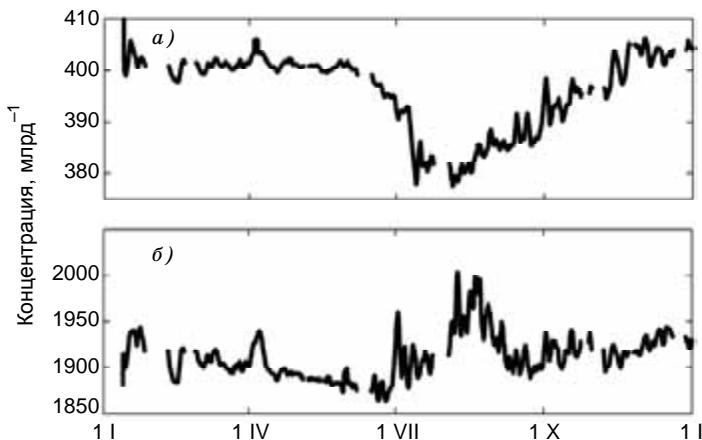


Рис. 4. Концентрации оксида углерода (а) и метана (б) по результатам непрерывных наблюдений в ГМО «Тикси» в 2011 г.

о которых шла речь в упомянутых выше работах, проходили в непосредственной близости от ГМО «Тикси» или на расстояниях 50—100 км от нее.

В работе Шаховой (Shachova, 2010) высокий уровень концентрации метана над шельфом морей восточной части Арктики объясняется дестабилизацией гидратов  $\text{CH}_4$ , обусловленной повышением температуры воды за последнее десятилетие. Однако приведенные на рис. 5 данные, характеризующие изменения температуры морской воды на шельфе моря Лаптевых за последние 35 лет (Biastoch, 2011), свидетельствуют о том, что за этот период каких-либо аномалий температуры воды, которые могли бы привести к разрушению гидратов, а следовательно, к выделению метана в атмосферу, не наблюдалось. Колебания температуры на глубине 100 м в период измерений, результаты которых приводятся в работе Shachova et al. (2010), как правило, не превышали 1,2 °С. Максимальная за 35-летний период (с 1970 по 2005 г.) годовая амплитуда температуры воды на шельфе наблюдалась в 1980—1982 гг. и в 1990 г., когда она составила 1,8 °С.

Сравним теперь данные измерений ГМО «Тикси» с данными, полученными с других полярных станций. Данные многолетних измерений концентрации метана на станции Барроу, расположенной на побережье Аляски в зоне прибрежного шельфа (Data

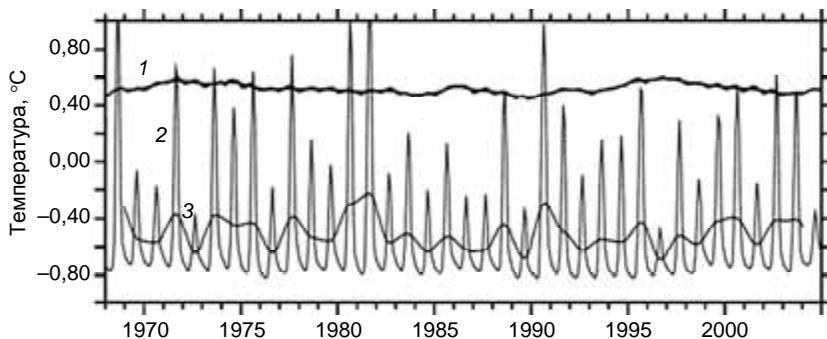


Рис. 5. Температура воды, рассчитанная по модели HINDCAST.

1 — среднегодовая температура на шельфе (глубина 0—100 м), 2 — среднегодовая температура на границе шельфа (глубина 416—793 м), 3 — среднемесячная температура на шельфе (глубина 0—100 м).

for greenhouse gases, 2011), показывают, что в период с 2001 по 2010 г. на этой станции в летние месяцы наблюдались повышенные концентрации метана (рис. 6).

Картина сезонных вариаций концентрации метана на станции Барроу очень напоминает картину сезонных вариаций метана на ГМО «Тикси», где пиковые значения приходятся не только на январь—февраль, но и на июль—сентябрь при амплитуде среднесуточных значений концентрации от 2050 до 2200 млрд<sup>-1</sup>. Однако среднегодовые значения концентрации метана на станции Барроу за 2009 и 2010 гг., ближайшие к началу измерений на Тикси, составили всего 1885,6 и 1896,4 млрд<sup>-1</sup> соответственно.

В эти же годы на другой арктической станции — Алерт, расположенной вне зоны прибрежного шельфа, среднегодовая концентрация метана в 2009 и 2010 гг. составила 1877,4 млрд<sup>-1</sup> (рис. 7). Высокие значения концентрации CH<sub>4</sub>, достигающие 2000 млрд<sup>-1</sup>, приходятся только на зимний период: январь—март. На станции Алерт в летние месяцы сохраняется ледовый покров (зоны, свободные от льда, вблизи станции отсутствуют). Данные станции

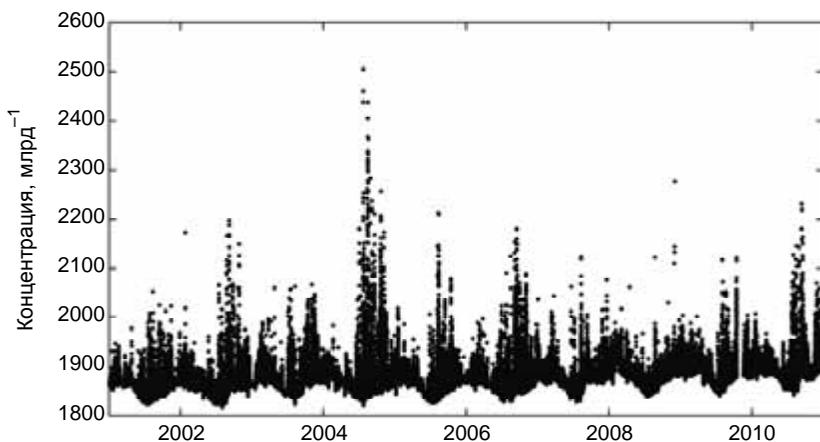


Рис. 6. Концентрация метана на станции Барроу (Аляска) за период с 2001 по 2010 г.

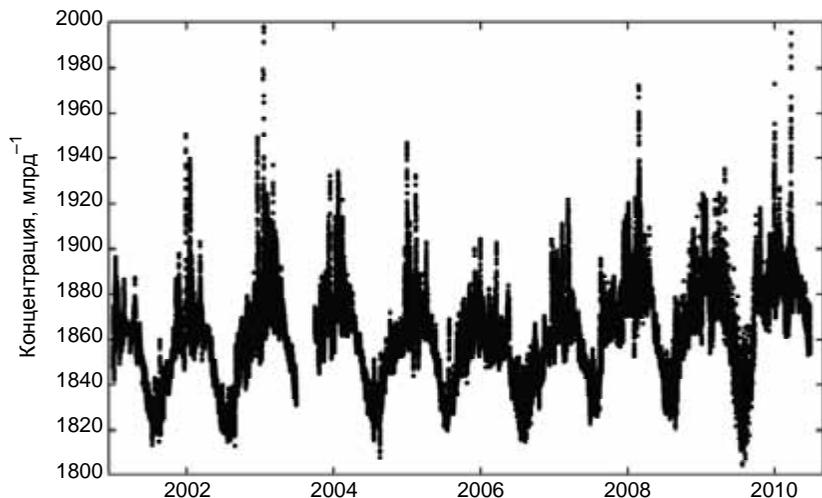


Рис. 7. Концентрация метана на станции Алерт в период с 2001 по 2010 г.

Алерт можно рассматривать и в качестве расчетного морского фона (ибо сравнения показали, что отличие среднегодовых значений концентраций метана на станции от MBL за период с 2002 по 2009 г. не превышало  $\pm 0,03\%$ ).

На российской станции Териберка среднегодовые значения концентрации метана составили в 2009 и 2010 гг. 1905,0 и 1906,1 млрд<sup>-1</sup> соответственно. Более высокие значения концентрации метана на станции Териберка, скорее всего, обусловлены наличием обширной незамерзающей части акватории Баренцева моря в течение почти всего года. На ГМО «Тикси», где этот период непродолжителен (в течение июля — сентября значительная часть моря Лаптевых остается под льдом), среднегодовая концентрация метана за 2011 г. составила  $1912,7 \pm 24,2$  млрд<sup>-1</sup>. Таким образом, наблюдаемое кратковременное повышение эмиссии метана в период «чистой воды», компенсируется снижением эмиссии метана после установления сплошного ледяного покрова на акватории моря Лаптевых.

Результаты обработки данных непрерывных измерений на ГМО «Тикси» за весь 2011 г. и данных флажечных измерений с

октября 2010 г. по июнь 2011 г. показали, что среднегодовые значения концентрации метана на ГМО «Тикси» в 2011 г. близки к соответствующим значениям на станции Барроу в 2010 г.

Согласно табл. 2, по данным как регулярных фляжечных (один раз в неделю), так и непрерывных измерений концентрации углекислого газа и метана за период с 2002 по 2010 г. не наблюдалось даже просто высоких значений среднегодовых концентраций обоих газов. Поэтому в настоящее время нельзя говорить о существовании значительных объемов выбросов метана от природных источников, расположенных на шельфе морей Лаптева, Новосибирского и Чукотского, которые могли бы привести к существенным изменениям климата, по крайней мере в ближайшие годы.

Таблица 2

**Среднегодовые концентрации диоксида углерода и метана по данным наблюдений на арктических станциях Северного Ледовитого океана**

Год	Териберка		Барроу		Алерт		Тикси	
	[CH <sub>4</sub> ], млрд <sup>-1</sup>	[CO <sub>2</sub> ], млн <sup>-1</sup>	[CH <sub>4</sub> ], млрд <sup>-1</sup>	[CO <sub>2</sub> ], млн <sup>-1</sup>	[CH <sub>4</sub> ], млрд <sup>-1</sup>	[CO <sub>2</sub> ], млн <sup>-1</sup>	[CH <sub>4</sub> ], млрд <sup>-1</sup>	[CO <sub>2</sub> ], млн <sup>-1</sup>
2002	1862,6	375,5	1862,2	374,2	1852,8	373,9		
2003	1879,3	377,7	1877,3	377,3	1864,7	377,2		
2004	1870,7	379,2	1866,4	378,7	1857,2	378,1		
2005	1870,7	381,6	1867,3	381	1851,6	379,6		
2006	1871,3	384,8	1865,5	383,4	1854,5	383,3		
2007	1877,3	385,0	1873,1	385	1869,1	384,7		
2008	1894,9	388,1	1883,8	387,4	1873,3	387,1		
2009	1905,0	390,4	1885,6	388,3	1877,4	388,1		
2010	1906,1	392,5	1896,4	390,8	1877,4	390,7		
2011							1912,7*	396,2
							1901,5**	398,2

\* Данные непрерывных измерений за 2011 г.

\*\* Данные фляжечных измерений, осредненные за период с октября 2010 г. по июнь 2011 г.

Данные о среднемесячных значениях концентрации метана в месяцы, когда акватории, прилегающие к станциям, свободны от льда, приведены в табл. 3.

Как следует из таблицы, на станциях Тикси, Барроу, Арлет в августе—сентябре, когда площадь сплошного льда в Северном Ледовитом океана в целом минимальна, наблюдаются максимальные значения концентрации метана. Причем на ГМО «Тикси» среднемесячное значение за август 2010 г. было на 19,5 млрд<sup>-1</sup> выше, чем на станции Барроу, и на 11,3 млрд<sup>-1</sup> выше, чем на станции Териберка. Еще более существенной разницы стала в сентябре, когда она составила 26,2 и 13,3 млрд<sup>-1</sup> соответственно.

Представленные оценки позволяют предполагать, что метан, скапливающийся под льдом морей Северного Ледовитого океана в районе шельфа в зимние месяцы, при освобождении соответствующей акватории от льда переходит в атмосферу. На основе имеющихся данных невозможно однозначно судить об источниках метана. Для этого потребуются, скорее всего, данные измерений изотопного отношения тяжелого изотопа метана <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> к основному изотопу <sup>12</sup>CH<sub>4</sub>.

Таблица 3

**Среднемесячные значения концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в месяцы, когда акватория моря Лаптевых и Северного Ледовитого океана у станции Барроу свободна от льда**

Месяц, год	Барроу		Териберка		Тикси	
	[CO <sub>2</sub> ], млн <sup>-1</sup>	[CH <sub>4</sub> ], млрд <sup>-1</sup>	[CO <sub>2</sub> ], млн <sup>-1</sup>	[CH <sub>4</sub> ], млрд <sup>-1</sup>	[CO <sub>2</sub> ], млн <sup>-1</sup>	[CH <sub>4</sub> ], млрд <sup>-1</sup>
07.2009	383,21	1856,65	382,1	1891,4	—	—
08.2009	376,17	1874,73	379,1	1897,1	—	—
09.2009	378,30	1887,09	380,3	1897,7	—	—
07.2010	384,89	1889,39	385,5	1888,9	—	—
08.2010	379,91	1889,95	380,5	1898,1	386,45	1909,4
09.2010	383,00	1899,70	383,0	1912,6	388,01	1925,9
07.2011	—	—	—	—	385,96	1909,2
08.2011	—	—	—	—	382,35	1959,0

## Заключение

Анализ данных регулярных наблюдений на арктических станциях показывает, что на шельфе морей восточной части Арктики существуют естественные источники эмиссии метана, действие которых проявляется в периоды продолжительностью от двух до трех месяцев, когда акватория региона имеет минимальный ледяной покров. Вклад таких относительно кратковременных эмиссий в среднемесячные значения концентрации метана составляет не более 1—3 %.

Согласно данным станций Барроу и Тикси, а также данным судовых наблюдений, превышение среднегодовой концентрации метана относительно расчетного морского фона в регионе не превышает 20—30 млрд<sup>-1</sup> (2—3 %).

Данные измерений, приводимые в работе Шаховой с соавторами (Shachova et al., 2010), нуждаются в тщательной проверке, прежде всего в части методики выполнения измерений и, возможно, калибровки измерительной шкалы. Не отрицая возможности залповых выбросов скопившегося под льдом метана (в том числе через талики в вечной мерзлоте) и высокой амплитуды вариаций концентрации метана, наблюдаемых в отдельные летние дни, можно с уверенностью утверждать, что в настоящее время они не могут привести к каким-либо значимым изменениям климата (Dlugokencky et al., 2009).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Шахова Н. Е., Семилетов И. П. и др. (2007). Аномалии метана в приводном слое атмосферы на шельфе Восточно-Сибирской Арктики // Доклады РАН. Т. 414, № 6. С. 819—823.

Blastoch A., Treude T., Rypke L. H., Riebesell U., Roth C., Burwicz E. B., Park W., Latif M., Buning C. W., Madec G., Wallmann K. (2011). Rising Arctic Ocean temperatures cause gas hydrate destabilization and ocean acidification // Geophys. Res. Lett. V. 38. L08602, doi:10.1029/2011GL047222.

Data for greenhouse gases and other atmospheric gases (2011) / WMO WDCGG DVD. No. 3. Japan Meteorological Agency.

Dlugokencky E. J. et al. (2009). Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH<sub>4</sub> burden // Geoph. Res. Let. V. 36. L 18803, doi:10.1029/2009GL039780.

*O'Connor Fiona M., Boucher O., Gedney N., Jones C. D., Folberth G. A., Coppel R., Friedlingstein P., Collins W. J., Chappellaz J., Ridley J., Johnson C. E. (2010). Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: a review // Reviews Geoph. 48. RG4005/2010, 2010RG000326.*

*Shakhova N. et al. (2010). Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the east siberian arctic shelf // Science, 327, 1246. Doi: 10.1126/science.1182221.*

*Westbrook, G. K. et al. (2009). Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin // Geoph. Res. Let. V. 36. L15608, doi:10.1029/2009GL039191.*

## МЕТОДИКА КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ВОЗДЕЙСТВИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ 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 31.05.2012  
Поступила после доработки 23.09.2012

Разработчики ГОСТ 16350, СНИП-23-0199, Руководства (2008), основываясь на известных работах Астафьева (1959), Бее-ра (1966), Копелиович (1966), Оржаховского (1968), Смита (1978) и многих других, справедливо отнесли температуру воздуха к основным воздействующим климатическим факторам (ВКФ). Энтропийная методология, предложенная автором (Кожевников, 1985, 2010), позволяет рассчитывать нагрузки от ВКФ и давать им объективные оценки. При этом описание воздействий атмосферы на техническое изделие выполнено на основе известных физико-химических соотношений и газовой нормирующей модели. Полученные результаты можно считать априорными, рассчитанными теоретически. Ведущая роль в этих исследованиях была отведена скорости производства термодинамической энтропии, которая, по определению, отображает в своих значениях накапливающуюся разупорядоченность внутренней структуры изделия (т. е. «потерю» его качества), вызываемую ВКФ. При этом другая сходная величина — скорость производства информационной энтропии — играла вспомогательную роль, так как применялась только для учета и анализа отдельных видов ВКФ.

Построенный приоритетный ряд оценок агрессивности ВКФ существенно «разошелся» с аналогичным рядом практических, апостериорных оценок диаграммы Коха (1981). Оценки диаграммы были получены методом рангового анализа мнений техниче-

ских экспертов различных специальностей о степени агрессивности большинства ВКФ.

В отличие от ранее предложенной автором методологии (Кожевников, 2010), в другой публикации (Кожевников, 2012) при анализе нагрузок от экстремальных температур воздуха ведущая роль была отведена второй величине — скорости производства информационной энтропии. Согласно работам Новицкого (1968) и Лазарева (2010), эта величина, так же как и скорость производства термодинамической энтропии, может отображать «потерю» качества изделия через уменьшение информативности его внутренней структуры, вызываемую ВКФ. Например, согласно паспортным записям на многие средства измерений (СИ), повышение (понижение) температуры окружающего воздуха на 10 °С и более сопровождается заметным уменьшением точности СИ и, следовательно, их информативности.

Настоящая работа продолжает это направление с ведущей ролью скорости производства информационной энтропии: в работе проанализированы источники расхождений физико-химических и экспертных оценок, а также разработана методика объективной, расчетной оценки агрессивности температурных воздействий по стандартизованным климатическим данным.

Прежде всего, расхождения оценок вызваны тем, что эксперты в своих наблюдениях связывали ухудшение свойств технических изделий с данными о текущей температуре окружающего воздуха, выраженными в градусах Цельсия. В результате в центре оценок экспертов в качестве знакопеременной точки шкалы температуры оказалась реперная отметка шкалы Цельсия 0 °С. Разумеется, возникающие негативные эффекты по умолчанию трактовались экспертами как следствия воздействий на технику именно «положительных» и «отрицательных» температур воздуха.

В сложно организованных изделиях эффекты от температурных воздействий являются результатом множества одновременно протекающих разнонаправленных процессов различной природы. Поэтому эксперты, не имея оснований отдать предпочтение ни одному из них, оценивали агрессивность влияния «положительных» и «отрицательных» температур воздуха единообразно

относительно точки  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такой подход может быть наглядно продемонстрирован линейным симметричным V-образным графиком зависимости агрессивности атмосферы от температуры воздуха с минимумом в точке  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и двумя максимумами, соответствующими экстремальным температурам воздуха. Согласно данным табл. 6 и 10 ГОСТ 16350 по «техническому» климату на территории бывшего СССР, экстремальные годовые температуры воздуха самой холодной и самой жаркой декады составляют  $-54,5$  и  $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Интервалы, ограниченные этими значениями и знакопеременной точкой  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соотносятся примерно как 10/9. Это, по мнению автора, во многом и предопределило именно такое отношение (10/9) экспертных оценок агрессивности воздействий «положительных» и «отрицательных» температур воздуха, зафиксированное диаграммой Коха.

Однако в нормативно-технических документах значение  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  никогда не включалось в «интервал нормальных температур воздуха». Смещение же знакопеременной отметки с  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  к температуре воздуха из «интервала нормальных значений» означает переход трактовки воздействий, ориентированных на «положительные и отрицательные температуры воздуха», к их определению через термины «положительные и отрицательные отклонения» температуры воздуха от значения, принятого за нормальное, например  $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такой переход нарушает симметрию графика оценок, так как одно его «плечо» для территории бывшего СССР возрастает до  $77\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $(54,5 + 22,5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а другое уменьшается до  $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $(49 - 22,5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Более того, если освещаемую территорию увеличить до размеров Земли, то, согласно ГОСТ 25650 и ГОСТ 24482, экстремальные температуры воздуха следует считать равными  $-88,3$  и  $51,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такое расширение интервалов доводит разницу «плеч» графика примерно до 110 и  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно. При этом отношение оценок агрессивности экстремальных воздействий «положительных и отрицательных отклонений» температуры принимает вид 10/3, что существенно отличается от соотношения оценок экспертов-практиков: 10/9.

Для устранения этого противоречия и решения задачи в соответствии с публикацией автора (Кожевников, 2012) был использован прием изменения скорости производства энтропии при переходе температуры воздуха через интервал нормальных значений, т. е. при смене знака отклонений температуры в точке 22,5 °С. С точки зрения физической химии такой скачок агрессивности ВКФ в непримечательной, «проходной» отметке термодинамической шкалы температуры выглядит более чем странным.

В какой-то мере повышенную агрессивность положительных отклонений можно объяснить возрастанием интенсивности негативных процессов при повышении температуры технических изделий. Так, в соответствии с уравнением Аррениуса число активных молекул, способных преодолеть энергетический барьер (например, в 100 кДж) для вступления в химическую реакцию, при повышении температуры от 0 до 22,5 °С увеличивается с  $46 \cdot 10^3 \pm 0,7 \%$  до  $1300 \cdot 10^3 \pm 1,4 \%$  молекул, а при повышении температуры от 22,5 до 50 °С число активных молекул возрастает уже до  $42\,000 \cdot 10^3 \pm 1,2 \%$ .

Этот негативный эффект может быть усилен поступлением какой-либо избыточной наружной энергии, например, вследствие поглощения молекулой изделия видимого света, при переходе электронов на более высокий уровень, при разрыве валентной связи, при воздействии электричества, при воздействии ультразвуковых колебаний, при действии жестких излучений различного рода. Уместно вспомнить также, что повышение температуры воздуха, сопровождающееся возрастанием его влагосодержания и, следовательно, появлением поверхностных пленок воды на изделиях (особенно, при температуре выше 25 °С), резко усиливает микробиологическую коррозию технических материалов, ибо мицелий грибов в этих условиях развивается особенно интенсивно.

Однако эти объяснения носят общий характер. На современном этапе развития технической метеорологии скачкообразное возрастание агрессивности атмосферы при повышении температуры воздуха выше нормальной может быть только зафиксировано как квалитетический факт. Этот факт может быть зафиксирован построением отдельных графиков оценок: один — «пологий» — для

воздействий отрицательных отклонений температуры воздуха, другой — «крутой» — для воздействий положительных отклонений. Подобный прием вполне допустим, так как разделение графиков выполняется по области разрыва оценочных функций, в которой скорость производства обоих видов энтропии из-за наличия разрыва равна нулю.

Разделение графиков целесообразно еще и потому, что это позволяет при расчетах отобразить явление остаточной агрессивности атмосферы в интервале нормальных условий. Общеизвестны процессы старения изделий, даже находящихся в нормальных условиях: стареют государственные эталоны и раритеты в запасниках музеев. Если согласиться с положением о том, что положительные отклонения температуры более агрессивны, чем отрицательные, то разделение графиков позволяет при оценках агрессивности среды объективно учесть направление «хода» температуры воздуха. Последнее явление вызвано инерционностью теплообмена технического изделия при изменении температуры окружающего воздуха.

Однако разделение графиков имеет и негативные последствия: из-за «грубой» дискретизации оси температуры, принятой в описаниях «технического» климата (ГОСТ 16350, табл. 25, 28; ГОСТ 24482, табл. 25, 26; ГОСТ 25650, табл. 7), в разделенных графиках за пределами отметки 25 °С появляются «мнимые» части. Эти части неоправданно усложняют расчеты нагрузок; их разумно исключить обратным приемом — «механическим» совмещением уже разделенных графиков в единый «объединенный график». Это допустимо по тем же соображениям, по которым разделение было произведено.

Кроме того, такое совмещение в дальнейшем позволяет ослабить действие второго источника расхождений физико-химических и экспертных оценок агрессивности ВКФ — неопределенности расчетной функции из-за разрыва ее кривой в исходном, первом делении графика, вызванного целочисленностью аргумента. Так, согласно информационно-статистическому подходу, интенсивность помехи от ВКФ, отображаемая скоростью производства информационной энтропии ( $-q_T$ ), определяется формулой

$$(-q_T)' = (k \ln N) / \Delta \tau, \quad (1)$$

где  $\Delta \tau$  — единица времени (с);  $k$  — модуль перевода информационных единиц:  $k = 1/\ln 2 = 1,4427$  бит/нит;  $N$  — порядковый (от знакоразделительной отметки) номер деления шкалы или интервала ее дискретизации, в который попадает результат измерения влияющего ВКФ.

Именно характер  $N$  и определяет целочисленность аргумента. В соответствии с формулой (1) в первом, исходном делении  $\ln 1 = 0$ , что как раз и означает вышеупомянутую неопределенность функций в пределах интервала нормальных значений. Интервал разрыва кривой, приводящей к неопределенности оценочной функции (1), достаточно широк. Так, согласно дискретизации оси температуры воздуха, принятой при описаниях «технического» климата, этот интервал достигает  $5^\circ\text{C}$ , что в дальнейшем при расчетах приводит к значительной (до 10 %) погрешности в определении нагрузок, вызванных влиянием температуры окружающего воздуха.

Для сведения подобных разрывов кривых расчетных функций к бесконечно малым интервалам в энтропийной методологии (Кожевников, 2010) используется эквивалентность информационной и термодинамической энтропии. Для этого кривые расчетных зависимостей скорости производства информационной энтропии, в частности от температуры воздуха, дополняются кривыми функции непрерывного аргумента, в роли которой выступает зависимость скорости производства термодинамической энтропии, в частности от той же температуры воздуха. Формула зависимости скорости производства термодинамической энтропии  $(\Delta_i S_T)'$  от температуры имеет вид

$$(\Delta_i S_T)' = C_p (T_H - T_C)^2 / (T_H T_{cp} \Delta \tau), \quad (2)$$

где  $C_p$  — теплоемкость моля воздуха при постоянном давлении (30,04 Дж/(К · моль));  $T_H$ ,  $T_C$  и  $T_{cp}$  — температура истока и стока как энергopotенциалов, а также их среднее значение.

Точками эквивалентности энтропий объединенного графика служат средние температуры отрезка шкалы, в который попадают

упомянутые предельные значения ( $-88,3$  и  $51,1$  °C). При центрировании интервалов дискретизации такие точки имеют значения  $185,7$  К ( $-87,5$  °C) и  $325,7$  К ( $52,5$  °C). Общей точкой эквивалентности объединенного графика выступает начало координат в отметке шкалы  $295,7$  К ( $22,5$  °C). Непрерывные интерполяционные прямые, исходящие влево и вправо из начала координат объединенного графика, соединяют начало координат и точки эквивалентности и служат линиями расчетных оценочных функций.

Описанная схема в опосредованном виде представлена в табл. 1. Таблица состоит из двух частей: первая часть предназначена для расчета нагрузок при отрицательных отклонениях температуры воздуха ниже значения  $22,5$  °C; вторая часть предназначена для расчета нагрузок при положительных отклонениях выше  $22,5$  °C. Шкала отклонений ( $t$  °C) с пятиградусной ценой деления визуализирована второй строкой табл. 1. Для наглядности в первой строке таблицы приведен порядковый номер каждого деления шкалы ( $N$ ), а в третьей — их приписные средние значения ( $t_{cp}$  °C). В четвертой строке приведена скорость производства термодинамической энтропии  $(\Delta_r S_r)'$ , рассчитанная для этих средних значений температуры по формуле (2) и выраженная в энтропийных единицах (э. е.), произведенных за единицу времени — секунду. В пятой строке приведены значения интенсивности информационного шума от температурных воздействий  $(-q_T)'$ , определяемые по формуле (1) для каждого ( $N$ ) деления. Принимая во внимание характер данных табл. 25 и 28 ГОСТ 16350, в шестой строке даны те же значения величины  $(-q_T)'$ , но в более крупных единицах — в часах. В седьмую строку заносятся стандартизованные данные (см., например, табл. 25 или 28 ГОСТ 16350) о продолжительности пребывания температуры воздуха в каждом делении (градации) за год в часах. Восьмая строка содержит суммы произведенной за год информационной энтропии (помехи) в каждой градации  $\sum_i(-q_T)$ . Девятая строка — техническая, с суммами, подсчитанными с нарастающим итогом; окончательный итог выделен в конце строки жирным шрифтом и представляет собой общее количество информационной энтропии, произведенной за год отклонениями температуры воздуха.

Как было отмечено выше, эквивалентность величин  $(\Delta_i S_T)'$  и  $(-q_T)'$  приписана отметкам шкалы 185,7 К ( $-87,5$  °С) и 325,7 К ( $52,5$  °С). При отрицательном отклонении температуры до 185,7 К из формулы (2) имеем:  $(\Delta_i S_T)'_- \approx 5,26$  Вт/(К · моль) или э.е./с, а из формулы (1) получаем:  $(-q_T)'_- \approx 4,52$  bps или бит/с. В этом случае на интервал нормальных значений приходятся «следы» агрессивности отрицательных отклонений температуры от 22,5 °С: 0,240 э.е./с и 0,197 bps соответственно. При положительных отклонениях температуры от 22,5 °С значения аналогичных величин равны:  $(\Delta_i S_T)'_+ \approx 0,27$  Вт/(К · моль) или э.е./с и  $(-q_T)'_+ \approx 2,81$  bps, «следы» агрессивности составляют 0,040 э.е./с и 0,401 bps соответственно.

Пределы температурной шкалы в табл. 1 ограничены фактическими интервалами, содержащими экстремальные температуры воздуха. Согласно табл. 25 (28) ГОСТ 16350 такими интервалами являются:  $-64,9 \dots -60$  и  $40 \text{—} 44,9$  °С. При отрицательных отклонениях температуры значения величин равны  $(\Delta_i S_T)'_- \approx 4,32$  Вт/(К · моль) или э.е./с;  $(-q_T)'_- \approx 3,54$  bps соответственно.

С целью испытания построенной методики в седьмую строку обеих частей таблицы были занесены данные табл. 25 (28) ГОСТ 16350 о продолжительности существования температуры воздуха в каждом делении за год в условиях «экстремального» пункта метеонаблюдений Оймякона — очень холодного климатического района. Продолжительность существования температуры воздуха в пределах интервала  $20 \dots 25$  °С была распределена между первой и второй частями таблицы пропорционально длительности «соседних» градаций. Так, длительность существования нормальных значений температуры воздуха за год в Оймяконе по табл. 25 (28) ГОСТ 16350 составляет 255 ч, а сходные значения длительности в «соседних» градациях равны 500 и 30 ч соответственно. Пропорционально этим долям временной интервал 255 ч был разделен между первой и второй частями таблицы в отношении 240/15. По этим значениям были рассчитаны суммы произведенной за год в нормальных условиях информационной помехи, которые оказались равными 0,17 и 0,02 Мбит/год. Эти значения выделены «жирным» шрифтом и внесены в соответствующие ячейки первой и второй частей таблицы.

**Климатические нагрузки на технику от воздействия отклонений  
в наблюдательном пункте с экстремальными условиями Оймякон**

*I. Отрицательные*

Характеристика	N							
	18	17	16	15	14	13	12	11
$t$ °C	-65... -60	-60... -55	-55... -50	-50... -45	-45... -40	-40... -35	-35... -30	-30... -25
$t_{cp}$ °C	-62,5	-57,5	-52,5	-47,5	-42,5	-37,5	-32,5	-27,5
$(\Delta_t S_T)'_{-}$ э.е./с	<b>4,32</b>	4,08	3,84	3,60	3,36	3,12	2,88	2,64
$(-q_T)'_{-}$ бит/с	<b>3,54</b>	3,34	3,15	2,95	2,75	2,56	2,36	2,16
$(-q_T)'_{-}$ кбит/ч	<b>12,74</b>	12,04	11,33	10,62	9,91	9,20	8,50	7,79
$\Delta\tau$ ч	8	119	691	705	262	629	509	410
$\Sigma_i(-q_T)_{-}$ Мбит	<b>0,10</b>	1,43	7,83	7,49	2,60	5,80	4,32	3,19
$\Sigma(-q_T)_{-}$ Мбит	<b>50,57</b>	50,47	49,04	41,21	33,73	31,13	25,34	21,01

*II. Положительные*

Характеристика	N		
	1	2	3
$t$ °C	20 — 25	25 — 30	30 — 35
$t_{cp}$ °C	22,5	27,5	32,5
$(\Delta_t S_T)'_{+}$ э.е./с	<b>0,04</b>	0,08	0,12
$(-q_T)'_{+}$ бит/с	<b>0,40</b>	0,80	1,20
$(-q_T)'_{+}$ бит/ч	<b>1,44</b>	2,89	4,33
$\Delta\tau$ ч	5	30	
$\Sigma_i(-q_T)_{+}$ Мбит	<b>0,02</b>	0,087	
$\Sigma(-q_T)_{+}$ Мбит		<b>0,087</b>	

Из первой части таблицы следует, что нагрузка от воздействия отрицательных отклонений температуры воздуха в Оймяконе  $\Sigma(-q_{-})_{год} \approx 50,57$  Мбит за год, а нагрузка на воздействия положи-

Таблица 1

температуры воздуха от нормального значения 22,5 °С  
очень холодного климатического района

отклонения

N									
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
-25...	-20...	-15...	-10...	-5...0	0...5	5...10	10...	15...	20...
-20	-15	-10	-5				15	20	25
-22,5	-17,5	-12,5	-7,5	-2,5	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5
2,40	2,16	1,92	1,68	1,44	1,20	0,96	1,44	0,48	<b>0,24</b>
1,97	1,77	1,57	1,38	1,18	0,98	0,79	0,59	0,39	<b>0,197</b>
7,08	6,37	5,66	4,96	4,25	3,54	2,83	2,12	1,42	<b>0,708</b>
352	270	335	389	628	682	784	834	500	250
2,49	1,72	1,90	1,93	2,67	2,41	2,22	1,77	0,71	<b>0,17</b>
17,82	15,33	13,61	11,71	9,78	7,11	4,70	2,48	0,71	

отклонения

N			
4	5	6	7
35 — 40	40 — 45	45 — 50	50 — 55
37,5	42,5	47,5	52,5
0,16	0,20	0,24	<b>0,267</b>
1,60	2,00	2,41	<b>2,81</b>
5,77	7,22	8,66	<b>10,1</b>

тельных отклонений  $\Sigma(-q_+)_{\text{год}} \approx 0,09$  Мбит за год. Если учесть, что при отрицательных отклонениях информационная помеха, равная 4,52 бита, эквивалентна физической нагрузке 5,26 Дж/(моль · К)

или э.е., то суммарная помеха за год  $\Sigma(-q_-)_{\text{год}} = (50,57 + 0,17) = 50,74$  Мбит за год в физическом плане эквивалентна  $\Sigma(\Delta_i S_-)_{\text{год}} \approx 58,96$  МДж/(моль · К) или Мэ.е. При положительных отклонениях температуры воздуха информационная помеха, равная 2,81 бита, эквивалентна физической нагрузке 0,27 э.е.; тогда суммарная помеха за год  $\Sigma(-q_+)_{\text{год}} = (0,09 + 0,02) = 0,11$  Мбит в физическом плане эквивалентна нагрузке  $\Sigma(\Delta_i S_+)_{\text{год}} \approx 0,01$  МДж/(моль · К) или Мэ.е. за год. По этой причине физическую нагрузку от воздействий положительных отклонений температуры воздуха в Оймяконе можно считать «исчезающее» малой, а погодноклиматические условия в очень холодном климатическом районе можно отнести к уникальным, состоящим только из воздействий отрицательных отклонений температуры воздуха.

Таким образом, в результате анализа источников расхождений физико-химических и экспертных оценок была разработана методика квалитетического расчета нагрузок от воздействий на технику температуры окружающего воздуха. Методика представлена в виде типовой таблицы, с помощью которой по стандартизованным данным о «техническом» климате могут быть получены объективные качественные оценки агрессивности температурных воздействий погодных условий климатических районов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Астафьев А. В.* (1959). Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. — М.: Энергия. 372 с.

*Берг В.* (1966) Техническая метеорология / Под ред. Л. Г. Качурина. — Л.: Гидрометеиздат. 285 с.

ГОСТ 24482—80. Макроклиматические районы земного шара с тропическим климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. — М.: Изд.-во стандартов, 1981. 94 с.

ГОСТ 25650—83. Климат Антарктиды. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. — М.: Изд.-во стандартов, 1983. 53 с.

ГОСТ 16350—80 (1981). Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. — М.: Изд.-во стандартов. 140 с.

*Кожевников Б. Л.* (1985). Влияние температурных воздействий атмосферы на надежность метеорологических приборов // Труды ГГО. Вып. 476. С. 89—95.

*Кожевников Б. Л.* (2010). Методика расчета комплексных оценок агрессивности погодно-климатических условий для технических целей / Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Специальность 25.00.30 — метеорология, климатология, агрометеорология. — СПб, ГГО. 34 с.

*Кожевников Б. Л.* (2012). О расчете нагрузок экстремальных температур воздуха на технику // Труды ГГО. Вып. 565.

*Копелиович С. К.* (1966). Опыт климатического районирования территории СССР для технических целей // Труды НИИАК. Вып. 37. С. 103—114.

*Кох П. И.* (1981). Климат и надежность машин. — М.: Машиностроение, 1981. 174 с.

*Лазарев В. Л.* (2010). Исследование систем на основе энтропийных информационных характеристик // Журнал технической физики. Т. 80, вып. 2. С. 1—7.

*Новицкий П. В.* (1968). Основы информационной теории измерений. — Л.: Энергия. 248 с.

*Оржаховский М. Л.* (1968). Общие закономерности влияния температуры и влажности воздуха на влагоустойчивость электроизоляционных конструкций // Электротехника. № 1. С. 6—17.

Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики (2008) / Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб, ГГО, с. 334 [Электронный ресурс]

URL:<http://www.voeikovmgo.ru/download/publikacii/2008/Rukovodstvo.pdf> (дата обращения 09.10.2011).

*Смит К.* (1978). Основы прикладной метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат. 423 с.

**ОЦЕНОЧНЫЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА  
РАССЕЯНИЯ ТЕПЛЫХ ТУМАНОВ ИСКУССТВЕННЫМИ  
КАПЛЯМИ ВОДЫ**

*И. М. Мамучиев*

Высокогорный геофизический институт  
360030 г. Нальчик, пр. Ленина, 2  
E-mail: main41@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2012

Исследования по активному воздействию (АВ) на туманы с целью их рассеяния в современных условиях очень актуальны для обеспечения безопасности навигации морских и воздушных судов, движения автомобильного транспорта на скоростных магистралях и т. д. В связи с этим вопрос поиска новых веществ (реагентов) и методов АВ, которые обеспечивали бы оперативное рассеяние тумана, стоит на одном из первых по важности мест. При этом важно, чтобы, помимо оперативности метода и дешевизны того или иного реагента, учитывался и экологический аспект. В этом смысле вода является одним из наиболее подходящих и легкодоступных веществ.

В исследованиях по рассеянию теплых туманов распылением воды, проводившихся в свое время многими авторами (Берлянд и др., 1961; Соловьев, 1978; Demon, 1955; Israel, Kasten, 1959), были получены неоднозначные результаты, что привело к отказу от дальнейших исследований в этом направлении. В частности, Н. С. Шишкиным была дана приближенная оценка процесса рассеяния тумана со средним радиусом капель 5 мкм и концентрацией  $10^8 \text{ м}^{-3}$  при внесении в него капель воды радиусом 50 и 100 мкм, которая показала, что распыление воды для рассеяния тумана не может дать нужного эффекта (Берлянд и др., 1961). Однако следует отметить, что при проведении этих расчетов не учитывался такой важный параметр, как коэффициент захвата,

который характеризует гидродинамическое взаимодействие капель при их движении и играет чрезвычайно важную роль в теории облако- и осадкообразования (Мазин, Шметер, 1983). Серьезные трудности, связанные с теоретическим и экспериментальным определением коэффициента захвата были преодолены лишь в 70-е годы XX века (Мазин, Шметер, 1983).

В работе Мамучиева (2005) на основе численных экспериментов было проведено детальное исследование процесса рассеяния теплого тумана, состоящего из капель радиусом 1—16 мкм, при активном воздействии на него искусственными (крупными) каплями воды радиусом 300, 600, 1000 и 1800 мкм. При этом было учтено гидродинамическое взаимодействие капель. Получено, что процесс коагуляции при АВ на туман каплями радиусом 300 мкм при их концентрации  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$  и  $10^4 \text{ м}^{-3}$  происходит очень медленно, что неприемлемо при проведении оперативных работ. В то же время, при АВ на туман каплями радиусом 600, 1000 и 1800 мкм при тех же концентрациях коагуляция проходит достаточно быстро и приводит к рассеянию тумана с показателями метеорологической дальности видимости 1000 м и более за 10—120 с.

Целью настоящей работы является использование данных (Мамучиев, 2005) для разработки автоматизированного метода АВ на теплые туманы на взлетно-посадочной полосе (ВПП) с применением переносного лафетного ствола ПЛС-20П (табл. 1) (Иванов и др., 1988), который нужно адаптировать для работы в автоматизированном режиме.

На рис. 1 представлена примерная схема расположения элементов (оборудования), обеспечивающих АВ на туман на ВПП.

*Таблица 1*

**Технические характеристики переносного лафетного ствола ПЛС-20П**

Диаметр насадки, мм .....	22	28	32
Рабочее давление, кПа (атм) .....	600 ( $\approx 6$ )	600 ( $\approx 6$ )	600 ( $\approx 6$ )
Расход воды, л/с .....	19	23	30
Дальность струи воды, м .....	61	67	68
Масса, кг.....	27	27	27

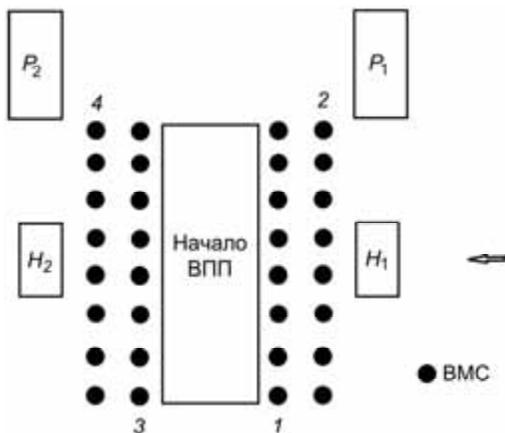


Рис. 1. Схема расположения водометных стволов (ВМС) на ВПП.

1, 2, 3, 4 — номера рядов расположения ВМС;  
 $P_1$ ,  $P_2$  — резервуары для воды;  $H_1$ ,  $H_2$  — насосы  
 для подачи воды в ВМС под давлением 6 атм.

Стрелка указывает направление ветра.

Рассмотрим ПЛС-20П с использованием насадки диаметром 32 мм (см. табл. 1). Размеры начала ВПП  $67 \times 550$  м (взяты с учетом дальности струи воды и международных стандартов для полетов самолетов в сложных метеорологических условиях (ИКАО) (<http://wapedia.mobi/ru>)). Расстояние между водометными стволами (ВМС) ПЛС-20П в рядах 1—4 (по восемь единиц в каждом) составляет 68 м.

Для направления ветра, показанного на рис. 1 (перпендикулярно ВПП), основным считается ряд ВМС под номером 1, который расположен на расстоянии 1 м от края ВПП и будет наиболее загружен, так как будет задействован как при штилевых условиях, так и при скорости ветра до 6 м/с, характерной для адвективных туманов (Матвеев, 1976). Остальные ряды являются вспомогательными: ряд 2 — при скорости ветра более 1 м/с, ряды 3 и 4 — в случае аномального изменения направления ветра, не характерного для местных условий. Ряд 3 может быть использован

также для АВ на зоны, не достигаемые для стволов ряда 1, т. е. на зоны, ближние к ряду 3.

Для обеспечения безопасности полетов желательно все ВМС установить в подземных капонирах так, чтобы срезы стволов находились на уровне земли и обеспечивали изменение угла раствора по горизонту (0—180° «веером») и вертикали (10—90°), согласно рис. 2 а и б соответственно (углы показаны для одного ВМС).

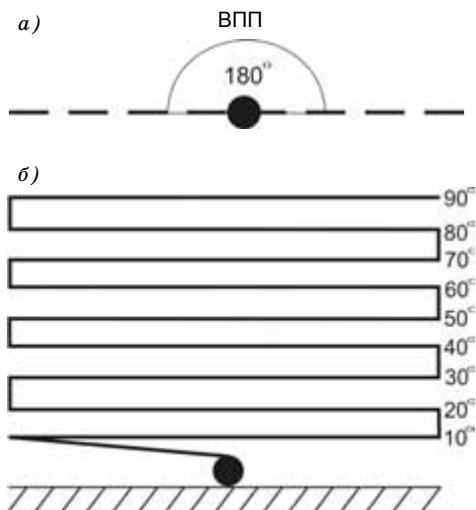


Рис. 2. Углы ВМС (или струи воды).

а — по горизонтали (вид на ВПП сверху), б — по вертикали (вид с тыльной стороны ствола).

Расстояние между рядами 1 и 2 на рис. 1 может быть определено из следующих соображений. Для простоты рассуждений предположим, что дальность струи воды при угле по вертикали 90° (с соблюдением углов «верности» засева 0—180° (см. рис. 2)) составляет 65 м, а скорость ветра — 6 м/с. Поскольку до конечной траектории струи долетают крупные капли с определенной градацией по фракциям в зависимости от размера, то возьмем для расчетов средний радиус капель (из спектра 600—2900 мкм) из табл. 2 (Бекряев, 1991), т. е. 1800 мкм.

Время  $t_{\text{к}}$  падения капли с высоты  $H$  найдем по формуле

$$t_{\text{к}} = \frac{H}{V}, \quad (1)$$

где  $V$  — скорость падения капли (см. табл. 2).

Тогда расстояние  $S$ , которое пролетит капля, можно определить по формуле

$$S = V_{\text{в}} t_{\text{к}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{в}}$  — скорость ветра.

Таблица 2

**Скорость падения капель воды относительно спокойного воздуха**

Радиус мкм	$V$ м/с	Радиус мкм	$V$ м/с
50	0,27	1300	7,57
100	0,72	1400	7,82
150	1,17	1500	8,06
200	1,62	1600	8,26
250	2,06	1700	8,44
300	2,47	1800	8,60
350	2,87	1900	8,72
400	3,27	2000	8,83
450	3,67	2100	8,92
500	4,03	2200	8,98
600	4,64	2300	9,03
700	5,17	2400	9,07
800	5,65	2500	9,09
900	6,09	2600	9,12
1000	6,49	2700	9,14
1100	6,90	2800	9,16
1200	7,27	2900	9,17

При радиусе капли, равном 1800 мкм, согласно формуле (1), она долетит до земли за 7,5 с (без учета прироста ее размера за счет коагуляции с каплями тумана) и будет отнесена ветром (по горизонтали) на 56 м в соответствии с формулой (2) (84 м для капель радиусом 600 мкм и 42 м для самых крупных капель радиусом 2900 мкм).

В то же время, при наличии такого ветра в ближней от ряда 2 зоне упадут самые крупные капли радиусом 2900 мкм, а остальные будут сдуваться и падать на ВПП в соответствии с размерами. Поэтому за дистанцию расположения ряда 2 от ряда 1 следует брать 41 м, а от края ВПП — 42 м. При этом капли радиусом 1800 мкм будут падать на ВПП на расстоянии 14 м от края (15 м от ряда 1), капли радиусом 600 мкм — в 40 м от края ВПП (41 м от ряда 1) и т. д. Для полного покрытия ВПП по ширине нужно будет уменьшить угол по вертикали стволов ряда 2 и задействовать ряд 1 под большими углами, чтобы обеспечить высоту обработки (засева) тумана над ВПП — 60—65 м.

Поскольку весь спектр капель 600—2900 мкм является очень активным в коагуляционном отношении (Мамучиев, 2005), то время рассеяния тумана за один цикл АВ на него составит около 14 с. Капли радиусом менее 500 мкм также будут вносить определенный вклад в коагуляционный процесс до тех пор, пока не покинут пределы ВПП.

Рассчитаем количество воды, необходимое для одного ВМС, при полном «сканировании» (засеве) тумана в автоматизированном режиме по схеме, приведенной на рис. 2.

Предположим, что весь процесс «сканирования» занимает 10 с. Тогда, согласно табл. 1, для засева тумана за это время потребуется 300 л воды, а для всего ряда 1 — 2400 л. В случае одновременной работы рядов 1 и 2 понадобится 4800 л воды, а для всех четырех рядов (экстремальный случай) — 9600 л за это же время. Отсюда следует, что резервуары  $P_1$  и  $P_2$ , установленные под землей и сообщающиеся между собой, должны иметь объем, рассчитанный примерно на 10 000 л. При этом предполагается, что на территории ВПП имеется водоотвод с дренажной системой для очистки воды и последующей ее подачи в резервуары  $P_1$  и  $P_2$  с целью многократного использования при АВ на туман. Также следует учесть дополнительный резерв в резервуарах  $P_1$  и  $P_2$  или

водоотвод с расчетом на капли тумана, выпадающие вместе с крупными каплями при коагуляции.

Таким образом, с помощью описанного метода АВ на теплые туманы на ВПП можно обеспечить посадку самолетов по II и III категориям ИКАО за короткое время. Кроме того, данный метод воздействия на теплые туманы характеризуется экологической чистотой и не требует больших затрат.

Следует отметить, что метод должен пройти апробацию в натуральных условиях для корректировки расположения стволов в рядах друг относительно друга и расстояния между рядами при различных углах ВМС. Не исключена вероятность установки между ВМС рядов (особенно, в ряду 1 (см. рис. 1)) дополнительных стволов на расстоянии 34 м друг от друга для охвата не охваченных соседними ВМС секторов засева. При этом нужно будет пересчитать емкости резервуаров  $P_1$  и  $P_2$  и мощности (или количество) насосов  $H_1$  и  $H_2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бекряев В. И.* (1991). Практикум по физическим основам воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеиздат. 144 с.

*Берлянд М. Е., Воронцов П. А., Красиков П. Н.* и др. (1961). Туманы. — Л.: Гидрометеиздат. 388 с.

*Иванов А. Ф., Алексеев М. Д., Безбородько М. Д., Максимов Б. А., Минаев Н. А., Степанов К. Н.* (1988). Пожарная техника. Ч. 1 и 2. — М.: Стройиздат. 408 с.

*Мазин И. П., Шметер С. М.* (1983). Облака. Строение и физика образования. — Л.: Гидрометеиздат. 280 с.

*Мамучиев И. М.* (2005). Численное моделирование активного воздействия на теплые и переохлажденные туманы / Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — Нальчик. 130 с.

*Матвеев Л. Т.* (1976). Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 642 с.

*Соловьев А. Д.* (1978). Исследование коагуляционных процессов воздействия // Труды ЦАО. Вып. 131. С. 76—82.

*Demon L.* (1955). Evolution, par coalescence provoquee, des aerosols et des brouillards // Genue chimique. № 74 (4). P. 97—105.

*Israel H., Kasten F.* (1959). Die Sichtweite im Nebel und Mnglichkeiten ihrer kynstlichen Beeinflussung // Forschungsberichte des Wirtschafts und Verkehrsministeriums. Nordrhein-Westfalen. № 640. P. 1—78.

**УЧЕТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ  
ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРИТОКА ВОДЫ  
В КОЛЫМСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА МАЙ**

*О. В. Соколов<sup>1</sup>, М. В. Ушаков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Дальневосточный региональный научно-исследовательский  
гидрометеорологический институт  
690990 Владивосток, ул. Фонтанная, 24  
E-mail: osokolov@ferhri.ru

<sup>2</sup> Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский  
институт ДВО РАН  
685000 Магадан, ул. Портовая, 16  
E-mail: mvilorich@narod.ru

Поступила в редакцию 19.06.2012

**1. Постановка задачи**

В Магаданской области на реке Колыме в 4 км выше устья реки Бохапчи в конце 1980 г. для нужд энергетики была построена плотина Колымской ГЭС (рис. 1), устойчивость работы которой обеспечивается аккумулярованием воды в водохранилище этой ГЭС (далее Колымское водохранилище). Объем воды водохранилища при нормальном подпорном уровне составляет 14,4 км<sup>3</sup>. В мае—сентябре происходит его наполнение, а зимой — сработка. Для безопасного пропуска высоких уровней весеннего половодья и дождевых паводков, а также для обеспечения судоходных уровней воды ниже ГЭС в период летне-осенней межени из Колымского водохранилища осуществляются пуски воды. В связи с этим службы эксплуатации ГЭС, речной транспорт, органы исполнительной власти нуждаются в долгосрочных прогнозах месячного притока воды в Колымское водохранилище.

До настоящего времени в Колымском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Колымское

УГМС) для прогноза притока на май использовалась методика, разработанная в 1977 г. (Комарицкая, 1977). В связи с происходящими климатическими изменениями, накоплением материалов гидрометеорологических наблюдений и возрастающими требованиями к качеству прогноза назрела необходимость разработать новую методику.

Задача осложняется тем, что ряд предиктанта — притока воды — является нестационарным: имеется статистически значимый тренд на повышение (табл. 1).

Наличие положительного тренда, вероятно, связано с современными глобальными изменениями климата, которые признаны большинством исследователей (Будыко и др., 1993, 1999; Израэль и др., 2001). Анализируя многолетние колебания среднеме-



Рис. 1. Карта-схема расположения Колымской ГЭС.

1 — плотина Колымской ГЭС, 2 — метеостанция Усть-Среднекам.

Таблица 1

**Статистические параметры ряда притока воды в Колымское водохранилище за май**

Длина ряда, число лет	Среднее, м <sup>3</sup> /с	$C_v$	$C_s/C_v$	Однородность	
				по среднему (критерий Стьюдента)	по дисперсии (критерий Фишера)
75	643	0,63	1,5	Нет	Да

Примечание.  $C_v$  — коэффициент вариации,  $C_s$  — коэффициент асимметрии.

сячной температуры воздуха на метеостанции Усть-Среднекан и притока воды в Колымское водохранилище в мае (рис. 2), а также график их корреляционной связи (рис. 3), можно сделать вывод, что постепенное увеличение стока в мае связано в том числе и с повышением температуры воздуха в этом месяце.

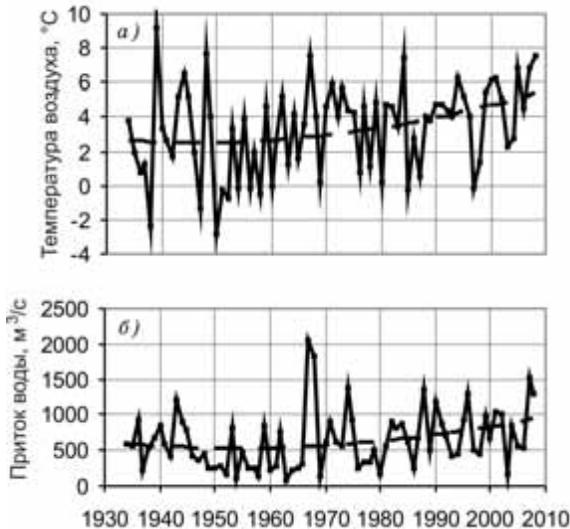


Рис. 2. Многолетний ход среднемесячной температуры воздуха в мае на метеостанции Усть-Среднекан (а) и притока воды в Колымское водохранилище за май (б).

Штриховая кривая — линии параболического тренда.

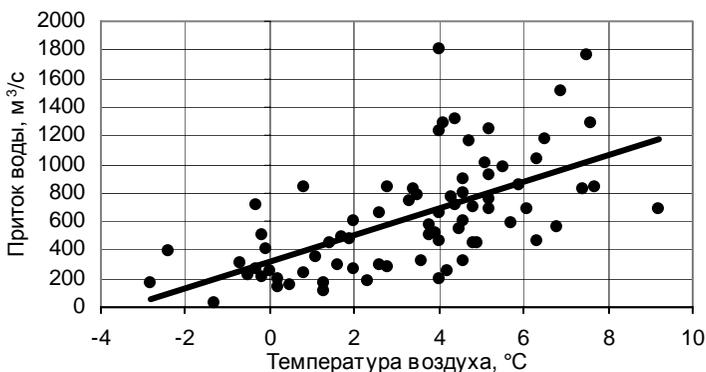


Рис. 3. Связь месячного притока воды в Колымское водохранилище со среднемесячной температурой воздуха на метеостанции Усть-Среднекан в мае.

## 2. Исходные материалы и методы исследования

В настоящей работе использованы данные о притоке воды за май в Колымское водохранилище и температуре воздуха на метеостанции Усть-Среднекан начиная с 1934 г., которые были получены в Колымском УГМС.

Предварительный анализ показал, что месячный приток воды в Колымское водохранилище в мае не зависит от запасов воды в снежном покрове: парный коэффициент корреляции статистически незначим. Этот факт объясняется тем, что большая часть талых вод поступает в речную сеть в июне. Количество же снеговой воды, стекающей с водосбора в мае, зависит от температурных условий в этом месяце (см. рис. 3). Следовательно, необходимо найти предикторы, которые определяют температуру воздуха в мае.

В качестве независимых переменных (предикторов) были выбраны месячные индексы атмосферной циркуляции начиная с 1950 г., которые представлены на сайте Центра предсказания климата США ([ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele\\_index.nh](ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh)), и средние годовые индексы солнечной активности (число Вольфа), доступные на сайте Королевской обсерватории

Бельгии (<http://sidc.oma.be/html/sunspot.html>). Используемые атмосферные индексы отражают макромасштабные и наиболее характерные особенности циркуляции и получены с использованием метода главных компонент с последующим вращением собственных векторов (Barnston, Livezey, 1987).

При разработке прогностической модели был использован множественный регрессионный анализ. Отбор предикторов осуществлялся при помощи анализа взаимных корреляционных функций связи предиктанта с предикторами. Далее путем анализа корреляционных матриц выбирались наиболее эффективные предикторы.

В условиях меняющегося климата целесообразно производить построение прогностической модели по скользящей обучающей выборке. Такой адаптивный подход к определению коэффициентов прогностического уравнения позволяет учесть изменяющиеся связи между зависимой и независимыми переменными.

### 3. Результаты исследования и их обсуждение

На основе корреляционного анализа для прогноза притока воды на май  $i$ -го года ( $Q_i$ ) отобраны два индекса атмосферной циркуляции: западно-тихоокеанский индекс за сентябрь в год  $i - 16$  ( $W_{i-16}$ ) и полярно-евразийский индекс за июль в год  $i - 11$  ( $P_{i-11}$ ):

$$Q_i = aW_{i-16} + bP_{i-11} + c. \quad (1)$$

Западно-тихоокеанский индекс характеризует интенсивность атмосферных процессов весной в северо-западной части Тихого океана и Восточной Азии. Полярно-евразийский индекс связан, в первую очередь, с повышенным фоном температуры воздуха в Восточной Сибири (Barnston et al., 1987). Ряды этих индексов не содержат тренды.

Получение параметров прогностических уравнений  $a$ ,  $b$  и  $c$  производилось по скользящей обучающей выборке длиной 20 лет, т. е. они тоже являются переменными, зависящими от времени.

Для сравнения были составлены прогнозы по традиционной технологии (обучающая выборка 25 лет — 1966—1990 гг.) с постоянными параметрами уравнения регрессии:

$$Q_i = 743 - 315W_{i-16} - 158P_{i-11}. \quad (2)$$

Верификация предложенной модели с адаптацией параметров уравнения регрессии на скользящей обучающей выборке (табл. 2) показала, что отношение средней квадратической ошибки прогнозов к среднему квадратическому отклонению прогнозируемого ряда составило  $S/\sigma = 0,73$ , оправдываемость прогнозов — 85,7 %. Согласно Наставлению (1962), методика пригодна для составления прогнозов.

Из табл. 2 видно, что качество прогнозов по традиционной технологии хуже, чем по предлагаемой адаптивной схеме. Кроме того, в отдельные годы методика с фиксированными коэффициентами прогностического уравнения выдает отрицательные прогнозные значения притока (1993, 2003 гг.), хотя знак аномалии предсказывается верно.

На рис. 4 представлен временной ход параметров уравнения (1). В периоды 1991—1994, 2008—2011 гг. превалировало влияние на предиктант западно-тихоокеанского индекса (коэффициент  $a$ ), а в период 1996—2006 гг. — полярно-евразийского индекса (коэффициент  $b$ ). Имеющийся тренд в исходном ряду притока воды компенсируется постепенным возрастанием свободного члена  $c$  в уравнении регрессии.

Интересно заметить (см. рис. 4), что полярно-евразийский индекс «работает» в противофазе с солнечной активностью, тогда как западно-тихоокеанский индекс имеет синфазный с ней ход. Это наводит на мысль о том, что, вероятно, эффективность «работы» того или иного предиктора как-то связана с солнечной активностью. Для подтверждения этой гипотезы необходимо дальнейшее накопление материалов наблюдений как минимум до начала 20-х годов XXI века, когда завершится текущий 11-летний солнечный цикл и начнется следующий. Если эта гипотеза окажется верна, то можно будет прогнозировать параметры уравнений регрессии на несколько лет вперед, а следовательно, и сам предиктант тоже.

Таблица 2

**Проверочные прогнозы притока (м<sup>3</sup>/с) в Колымское водохранилище  
на май**

Год	Фактический приток, м <sup>3</sup> /с	Качество прогнозов по предлагаемой методике с адаптацией коэффициентов уравнения регрессии			Качество прогнозов с фиксированными коэффициентами уравнения регрессии		
		Прогноз	Ошибка	Оценка	Прогноз	Ошибка	Оценка
<i>Авторские испытания на независимом материале</i>							
1991	863	598	-265	+	677	-186	+
1992	711	561	-150	+	532	-179	+
1993	428	189	-239	+	-33	-461	-
1994	458	471	13	+	376	-82	+
1995	927	721	-206	+	772	-155	+
1996	1280	1115	-165	+	1425	145	+
1997	507	709	202	+	857	350	-
1998	444	421	-23	+	559	115	+
1999	982	825	-157	+	1213	231	+
2000	681	308	-373	-	421	-260	+
2001	1040	981	-59	+	966	-74	+
2002	1010	554	-456	-	391	-619	-
2003	177	213	36	+	-68	-245	+
2004	843	785	-58	+	922	79	+
2005	553	562	9	+	450	-103	+
2006	542	367	-175	+	251	-291	-
2007	1510	611	-899	-	620	-890	-
2008	1290	1053	-237	+	1056	-234	+
<i>Производственные испытания на независимом материале</i>							
2009	864	956	92	+	942	78	+
2010	733	860	127	+	639	-94	+
2011	530	793	263	+	661	131	+
Оправдываемость, %			85,7 %			76,2 %	
Отношение S/σ			0,73			0,81	

*Примечание.* Знаком «плюс» обозначены оправдавшиеся прогнозы при допустимой ошибке 280 м<sup>3</sup>/с.

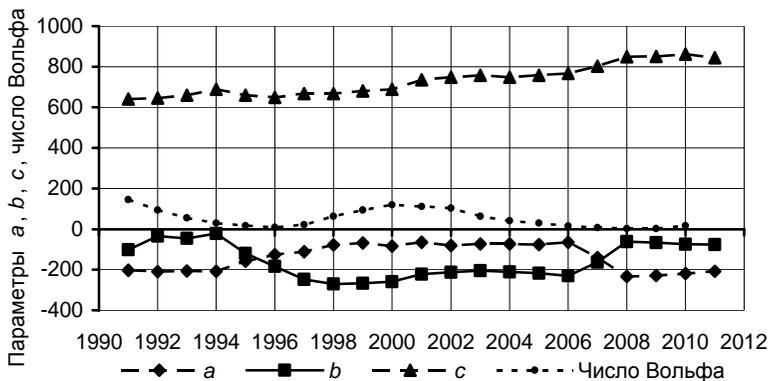


Рис. 4. Временной ход параметров уравнения регрессии в формуле (1) и индекса солнечной активности (число Вольфа).

Механизм наличия дальних асинхронных связей притока воды в Колымское водохранилище с индексами атмосферной циркуляции неясен. Однако это обстоятельство не должно служить препятствием для решения проблемы долгосрочного прогнозирования с применением обнаруженных эмпирических связей. Так, в работе Ракиповой (1974) для частного случая отмечается, что отсутствие знаний механизмов солнечно-земных связей не может служить препятствием для решения проблемы прогнозирования погоды с их учетом эмпирическими и статистическими методами.

### Заключение

В результате проведенного исследования получена удовлетворительная методика прогноза притока воды в Колымское водохранилище на май. Показано, что при разработке прогностических моделей в условиях меняющегося климата целесообразно использовать метод скользящей обучающей выборки.

Полученная методика реализована на ПЭВМ и прошла успешные производственные испытания в Колымском УГМС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Будыко М. И., Ефимова Н. А., Лугина К. М.* (1993). Современное потепление // Метеорология и гидрология. № 7. С. 29—34.

*Будыко М. И., Ефимова Н. А., Строкина Л. А.* (1999). Эмпирические оценки изменения климата к концу XX столетия // Метеорология и гидрология. № 12. С. 5—12.

*Израэль Ю. А., Груза Г. В., Катцов В. М., Мелешко В. П.* (2001). Изменение глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорология и гидрология. № 5. С. 5—22.

*Комарицкая Ю. Н.* (1977). Методика прогноза месячного притока воды в водохранилище Колымской ГЭС в летний период. — Магадан, Колымское УГМС. 110 с.

Наставление по службе прогнозов (1962). Разд. 3. Ч. I. Служба гидрологических прогнозов. Прогнозы режима вод суши. — Л.: Гидрометеоиздат. 193 с.

*Ракипова Л. Р.* (1974). Взаимодействие между верхними и нижними слоями земной атмосферы для спокойных и возмущенных периодов солнечной активности // Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды. — Л.: Гидрометеоиздат, с. 161—167.

*Barnston A. G., Livezey R. E.* (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. V. 11, № 6. P. 1083—1126.

## **Анна Васильевна Мещерская** **К 80-летию со дня рождения**

21 октября 2012 г. исполнилось 80 лет заведующей лабораторией расчетных методов метеорологических прогнозов отдела динамической метеорологии ГГО, доктору географических наук Анне Васильевне Мещерской.

В 1955 г. Анна Васильевна, окончив с отличием Ленинградский государственный университет (кафедра метеорологии и климатологии), поступила в аспирантуру Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Вся дальнейшая научная, трудовая и общественная жизнь Анны Васильевны прочно связана с ГГО и с отделом динамической метеорологии.

Научная деятельность А. В. Мещерской всегда имела практическую направленность и была сосредоточена на задачах долгосрочных метеорологических прогнозов, анализе данных наблюдений и изменения климата. Многие годы она под руководством профессора М. И. Юдина развивала широко известный комплексный физико-статистический метод долгосрочного прогноза погоды. Впоследствии на этой основе А. В. Мещерской был разработан видоизмененный метод прогноза многофакторной регрессионной средней. Составляемые на основе этого метода под ее руководством долгосрочные прогнозы месячных аномалий температуры воздуха и количества осадков на вегетационный и отопительный периоды с заблаговременностью в несколько месяцев востребованы и активно используются в Гидрометцентре России.

Большое количество исследований А. В. Мещерской посвящено мониторингу изменений климата, в том числе характеристик температурно-влажностного, ветрового, циркуляционного режима. Особо следует отметить детальные исследования причин колебаний уровня Каспийского моря и разработанный метод прогноза уровня Каспия, позволяющий прогнозировать изменения уровня с заблаговременностью более одного года.

А. В. Мещерская является одним из авторов ставшей классической монографии «Естественные составляющие метеорологических полей» (1970). В течение многих лет под ее руководством

выполнялись работы по анализу и обобщению данных наблюдений за осадками, влагосодержанием почвы и снежного покрова, по расчетам и анализу индексов засушливости, были подготовлены справочные издания, содержащие многолетние ряды этих характеристик по областям для основной сельскохозяйственной зоны СССР, а также результаты анализа их пространственно-временной структуры.

А. В. Мещерская является автором более ста научных статей и монографий, редактором целой серии сборников Трудов Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, редактором и одним из ведущих авторов Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, была организатором ряда симпозиумов по применению статистических методов в метеорологии.

Являясь ученым секретарем Диссертационного совета ГГО, Анна Васильевна много сил отдает подготовке к защите кандидатских и докторских диссертаций специалистами Росгидромета и иностранными специалистами, проявляет особую заботу о молодых сотрудниках.

За многолетний плодотворный труд Анна Васильевна Мещерская неоднократно отмечалась правительственными наградами, ей присвоено звание «Заслуженный метеоролог Российской Федерации».

В настоящее время Анна Васильевна продолжает активную научную деятельность. Коллектив сотрудников Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова сердечно поздравляет Анну Васильевну с юбилеем и желает ей крепкого здоровья, благополучия, бодрости и неиссякаемой энергии, новых творческих достижений.

## **Борис Михайлович Ильин** **К 75-летию со дня рождения**

19 июля 2012 г. исполнилось 75 лет заведующему лабораторией методов автоматизированного контроля и экономических исследований Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова Борису Михайловичу Ильину.

Б. М. Ильин поступил на работу в ГГО в 1962 г., окончив Ленинградское арктическое училище (ЛАОУ) со специализацией «аэрология» и Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ) по специальности «метеорология».

В начале 60-х годов в научных организациях Гидрометеослужбы СССР началось активное внедрение новых вычислительных средств и математических методов обработки. В Обсерватории был организован отдел вычислительных методов, который и возглавил Б. М. Ильин, проработавший к тому времени несколько лет в отделе динамической метеорологии. Вся его последующая профессиональная и научная деятельность в ГГО связана с вычислительной техникой и методами автоматизированной обработки метеорологической информации. С 1979 г. Б. М. Ильин — сотрудник методического отдела ГГО.

В 1970 г. Б. М. Ильин защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук.

Под руководством и при непосредственном участии Б. М. Ильина разработаны и внедрены в оперативную работу центров обработки комплексы программ обработки данных геофизических наблюдений и пространственного контроля режимной метеорологической информации, научные основы и методические указания по восстановлению пропущенных и забракованных данных, а в последние годы программы автоматизированной корректировки осадков и автоматизированной обработки результатов параллельных синхронных наблюдений по табельным и внедряемым СИ.

Б. М. Ильин уделяет большое внимание подготовке молодых специалистов в области использования вычислительной техники, является инициатором и вдохновителем компьютеризации работ по планированию, отчетности и собственно научно-исследовательских

работ. Он организует и осуществляет руководство работами в отделе по применению на практике современных ПЭВМ.

Б. М. Ильин — автор более 50 научных работ. За многолетнюю и активную творческую деятельность он награжден медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», знаком «Почетный работник Гидрометеослужбы России». В 1999 г. ему присвоено звание «Заслуженный метеоролог России».

Борис Михайлович пользуется заслуженным уважением и авторитетом среди сотрудников отдела и Обсерватории.

Коллеги и друзья сердечно поздравляют Бориса Михайловича с юбилеем и желают ему здоровья и новых творческих успехов.

## **Герман Петрович Резников** **К 75-летию со дня рождения**

2 августа 2012 г. исполнилось 75 лет ведущему метеорологу-методисту, старшему научному сотруднику лаборатории метеорологических измерений ОМРЭИ Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова Герману Петровичу Резникову.

Г. П. Резников поступил на работу в ГГО в 1961 г., по окончании Ленинградского института точной механики и оптики.

Профессиональная и творческая деятельность Г. П. Резникова посвящена метеорологическим и методическим исследованиям и разработке средств обеспечения геофизических измерений (параметров влажности и оптики атмосферы).

Герман Петрович стал одним из основных исполнителей многих документов организационно-методического и научно-технического характера, внедренных на наблюдательной сети Росгидромета. Он — автор многих программ испытаний новых технических средств и неоднократный участник этих испытаний. Ему принадлежат блестяще выполненные различного рода аналитические обзоры технического состояния и перспектив развития наземной наблюдательной сети.

В последние годы Г. П. Резников принимает активное участие в методическом и техническом обеспечении работ по реализации проекта «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета».

На протяжении многих лет Г. П. Резников возглавлял совет ВОИР ГГО и активно участвовал в работах по изобретательству и рационализации. Ему принадлежит более 30 научных работ, в том числе 18 авторских свидетельств на изобретения. В 1987 г. он удостоен звания «Лучший инженер по новой технике Госкомгидромета СССР». Его разработки были отмечены дипломами и медалями ВДНХ, он награжден медалью «Ветеран труда».

Обладая энциклопедическими познаниями, Г. П. Резников щедро делится ими с коллегами, со слушателями курсов повышения квалификации метеорологов сети.

Коллеги и друзья сердечно поздравляют Германа Петровича с юбилеем и желают ему здоровья, новых творческих успехов и неожиданных идей.

УДК 551.509

**Опыт калибровки вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха, полученных на основе ансамблевых расчетов по гидродинамической модели атмосферы ГГО.** Мирвис В. М., Львова Т. Ю., Мелешко В. П., Матюгин В. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 7—25.

Изложены результаты использования трех методов калибровки ансамблей применительно к вероятностному прогнозу приземной температуры воздуха на месяц с детализацией по неделям для территории Северной Евразии. Рассмотрены: непараметрический расчет вероятностей с коррекцией смещения (НПКС), параметрический расчет с коррекцией смещения и стандартного отклонения (ПКСС), а также расчет вероятностей на основе модели байесовского усреднения (Bayesian model averaging, BMA). Показано, что калибровка на основе методов ПКСС и BMA при близких результатах имеет явное преимущество перед использованием метода НПКС.

*Ключевые слова:* ансамблевый прогноз, вероятностный прогноз, методы калибровки, модель байесовского усреднения, приземная температура воздуха.

Табл. 2. Ил. 4. Библ. 13.

УДК 552.509

**Оценки оправдываемости оперативных метеорологических прогнозов, составленных методом многофакторной регрессионной средней для основной зерносеющей зоны России и сопредельных стран.** Мещерская А.В., Голод М. П. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 26—41.

Приведены оценки оправдываемости сверхдолгосрочных прогнозов средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков, которые ежегодно (1998—2011 гг.) составляются методом многофакторной регрессионной средней для основной зерносеющей зоны России, Украины, Белоруссии и Казахстана. Заблаговременность прогнозов составляет 7—13 мес. Показано, что за 14 лет оправдываемость оперативных прогнозов средней месячной температуры воздуха составила 68,7 и 50,2 % за теплую (IV—IX) и холодную (X—III) половину года соответственно, что на 2,9 и 7,9 % выше оправдываемости климатических прогнозов. Коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими полями средней месячной температуры воздуха  $r = 0,22$ , оценка по знаку  $\rho = 0,22$ , средняя квадратическая ошибка  $\delta = 2,55$  °С. Оправдываемость прогнозов месячных сумм осадков ниже оправдываемости климатических прогнозов.

*Ключевые слова:* успешность сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов, климатических прогнозов, заблаговременность прогнозов.

Табл. 3. Ил. 6. Библ. 15.

551.465.7, 539.186, 551.576.1

**Газообмен через поверхность Баренцева моря (модельные оценки с учетом переноса газа пузырьками при шторме).** Бортковский Р. С., Орленко Л. Р., Надёжина Е. Д., Стернзат А. В., Павлова Т. В., Пикалёва А. А., Молькентин Е. К., Егоров Б. Н. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 42—60.

Принято считать, что в Баренцевом море происходит значительный сток углекислого газа из атмосферы. Однако современные оценки потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  через поверхность раздела вода—воздух являются весьма неопределенными. Сезонные и пространственные изменения потоков газа через поверхность вода—воздух исследовались в настоящей работе с помощью новой версии модели газопереноса. В качестве входных параметров модели газопереноса используются климатические данные региональной климатической модели (РКМ) ГГО и Глобальной климатической модели ЕСНАМ. Выполнены оценки интегрального годового стока  $\text{CO}_2$  через поверхность Баренцева моря.

*Ключевые слова:* потоки углерода, кислород, климат, Баренцево море, газообмен пузырьками.

Табл. 1. Ил. 4. Библ. 22.

УДК 551.583.001.57:661.97

**О новой методике статистического моделирования влияния гидрометеорологических факторов на аномалии урожайности сельскохозяйственных культур.** Менжулин Г. В., Павловский А. А., Савватеев С. П. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 61—77.

Описывается методика моделирования аномалий урожайности, базирующаяся на анализе ансамбля регрессионных зависимостей аномалий урожайности от метеорологических факторов. Приводятся примеры ее использования для оценки изменений повторяемости аномальных по урожайности лет с использованием одного из климатических сценариев, рекомендованных в Четвертом отчете МГЭИК.

*Ключевые слова:* тренды и аномалии урожайности, регрессионные модели, агроклиматические последствия изменений глобального климата.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 13.

УДК 551.583.001.57 :661.97

**Оценки возможных агроклиматических последствий глобального потепления в сельскохозяйственных регионах Северной Европы.** Менжулин Г. В., Павловский А. А., Савватеев С. П. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 78—93.

Представлены результаты расчетов повторяемости аномальных по урожайности пшеницы лет при будущих изменениях климата в четырех областях России, в графствах Швеции и Дании, в Великобритании, Ирландии, Финляндии и странах Балтии. Использована новая методика, основанная на многовариантном подходе. Выявлена определенная «антифазность» повторяемости аномальных по урожайности лет в разных регионах севера Европы.

*Ключевые слова:* аномалии урожайности, зернопроизводство европейских стран, агроклиматические последствия глобального потепления.

Табл. 3. Библ. 14.

УДК 551.5+327+339

**Статистика дневных максимумов температуры в летний период и возможные проблемы энергоснабжения.** Салль М. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 94—99.

Обсуждается статистика дневных максимумов температуры воздуха в летний период в Москве. При увеличении числа дней с высокой температурой воздуха возможно возникновение проблем с энергоснабжением из-за широкого распространения систем кондиционирования. В работе представлены некоторые экономические оценки.

*Ключевые слова:* температура воздуха, статистический анализ, экономические оценки.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 5.

УДК 551.5+327+339

**R/S-статистика атмосферного давления.** Салль М. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 100—105.

Рассматривается применение R/S-статистики к изучению изменений атмосферного давления. Вводится такая числовая характеристика, как время персистентности, которое определяет степень погодной изменчивости в той или иной местности. Приведены примеры вычисления фрактальной размерности кривой атмосферного давления, определяющей степень детерминированности погодных условий.

*Ключевые слова:* атмосферное давление, R/S статистика, погодные условия.

Ил. 3. Библ. 3.

УДК 551.5

**Исследование значимости атмосферных возмущений.** Майборода Л. А., Дивинский Л. И. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 106—115.

Показано, что, используя вычисленные коэффициенты значимости, характеризующие вклад каждого фактора в формирование дисперсии исследуемой функции, все случайные факторы можно разделить на существенные и несущественные. Из числа существенных факторов можно выделить слабо и сильно изменяющиеся факторы. Приведено условие, при котором фактор можно считать слабо изменяющимся.

*Ключевые слова:* движение летательных аппаратов, атмосферные возмущения, коэффициент нелинейности, модель.

Табл. 2. Библ. 14.

УДК 551.5

**Статистический анализ нелинейных систем по линейному приближению.** Майборода Л. А., Дивинский Л. И. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 116—127.

Исследована возможность использования линейного приближения для статистического анализа нелинейных систем. Получено, что результаты исследований линейной модели могут быть достаточно эффективно использованы в качестве первого приближения при исследовании нелинейных стохастических дифференциальных уравнений процесса управления движением летательных аппаратов в атмосфере.

*Ключевые слова:* нелинейные процессы, линейная модель, математическая статистика, методы, управление летательными аппаратами.

Библ. 3.

УДК 551.3+519.63

**Некоторые особенности статистики водности полей облаков неглубокой конвекции.** Довгалюк Ю. А., Игнатьев А. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 128—138.

На основе LES моделирования проведено исследование статистики водности полей облаков неглубокой конвекции. Показано, что функция распределения водности убывает экспоненциально. Выявлено, что практически во всех случаях на оси водности имеется точка, где скорость экспоненциального убывания меняется скачком. Это значение может быть выбрано в качестве некоторого характерного масштаба водности. Схожую особенность можно также найти и в экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* численное моделирование, поля конвективных облаков, LES модель, водность, функция распределения.

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 17.

УДК 551.594

**Аномалии в записях электрического поля для случая сильного землетрясения в Алматинском сейсмическом регионе.** Салихов Н. М., Дробжева Я. В., Краснов В. М., Дробжев В. И., Жумабаев Б. Т. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 139—154.

На основе измерений электрического поля перед сильным капчагайским землетрясением в Казахстане и во время него были выявлены три типа аномалий. Для выяснения возможной связи данных возмущений с процессами подготовки землетрясения проведен анализ записей электрического поля и микровариаций атмосферного давления с 3 апреля 2011 г. по 15 июня 2012 г. Показано, что особенности поведения всех трех типов возмущений электрического поля не исключают возможность их связи с процессами, сопутствующими капчагайскому землетрясению.

*Ключевые слова:* аномалии электрического поля, микровариации атмосферного давления, землетрясение.

Ил. 11. Библ. 6.

УДК.551.594

**Влияние криптона-85, радона и продуктов его распада на структуру электродного приземного слоя атмосферы.** Морозов В. Н., Шапкалиевски М., Орленко Л. Р. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 155—168.

Рассматривается влияние радиоактивных веществ ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $\text{Kr-85}$ ) на структуру электродного приземного слоя. Задача решается в предположении, что интенсивность ионнообразования, создаваемая этими веществами, превышает фоновую интенсивность ионообразования, обусловленную естественными факторами. С учетом турбулентного обмена рассчитываются высотные распределения интенсивности ионообразования, концентрации легких ионов, электрической проводимости и напряженности электрического поля.

*Ключевые слова:* электродный приземный слой, радиоактивные вещества.

Табл. 3. Ил. 5. Библ. 11.

УДК 551.509

**Влияние влажности на электрические и микроструктурные характеристики аэрозоля.** Ивлев Л. С., Довгалюк Ю. А. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 169—181.

Обсуждаются эффекты влияния изменения относительной влажности на перестройку микроструктуры аэрозоля и электрические характеристики воздуха. Кроме конденсационного роста частиц, в этом процессе важную роль играют динамические перемещения воздушных масс и селективные процессы адсорбции ионов на поверхности частиц.

*Ключевые слова:* относительная влажность, микроструктура аэрозоля, напряженность электрического поля, легкие ионы, объемный заряд, полярная проводимость, морфология частиц.

Табл. 2. Ил. 5. Библ. 12.

УДК 551.509: 502.36

**Метеоролого-экономическая модель метеозащиты мегаполиса.** Козлов В. Н., Акселевич В. И. Мазуров Г. И. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 182—202.

Рассматривается получение потенциального экономического эффекта при проведении метеозащиты мегаполиса от экстремальных снегопадов методом активных воздействий на облачные системы. Представлены результаты расчетов оценки экономического эффекта при возможной метеозащите Санкт-Петербурга 9—13 декабря 2010 г. Делается вывод об эффективности организации метеозащиты от экстремальных снегопадов.

*Ключевые слова:* метеозащита, экономический эффект, эффективность, метеоролого-экономическая модель.

Табл. 5. Ил. 1. Библ. 13.

УДК 551.006.92(47+57)

**Совершенствование технологий метеобеспечения на основе комплексирования автоматизированных метеорологических информационно-измерительных систем и сетей.** Кондратюк В. И., Медведев Д. Н., Персин С. М. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 203—213.

Рассматриваются вопросы формирования единых потоков метеорологической информации от сети АМИИС и автоматизированной метеорологической наблюдательной сети. Проводится сопоставление характеристик, методов, алгоритмов и технологий для автоматизированных систем наземной метеорологической сети и сети метеорологического обеспечения аэродромов с позиций оптимизации процесса получения исходной метеорологической информации о состоянии приземного слоя атмосферы.

*Ключевые слова:* потоки метеоинформации, автоматизированные метеорологические информационно-измерительные системы, интеграция потоков, комплексирование технологий.

Библ. 19.

УДК 501.508

**Автоматическое формирование информации о климатических характеристиках аэродрома.** Персин С. М., Анискин Л. В., Медведев Д. Н., Попов В. Н. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 214—226.

Рассмотрен комплекс вопросов автоматического формирования данных о климатических характеристиках аэродрома, являющихся необходимой составной частью метеорологического обеспечения полетов. Описаны технология и алгоритмы обработки, реализуемые в программно-аппаратном комплексе аэродромной измерительно-информационной системы АМИС-РФ при создании архивов данных за длительные сроки (не менее 10 лет), результатов их обработки и представления (месячных, годовых и многолетних таблиц повторяемости метеоявлений и их продолжительности, графиков, диаграмм и др.).

*Ключевые слова:* аэродром, метеорологическое обеспечение, автоматизация, климатические характеристики, метеорологические параметры и явления, архивы.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 5.

УДК 551.5

**Измерение толщины водосодержащего слоя дорожным датчиком.** Зименков П. С. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 223—233.

С помощью упрощенной модели прохождения электрического тока между электродами, расположенными по одну сторону водосодержащего слоя, рассчитана зависимость отношения проводимостей сенсоров различной геометрии от толщины этого слоя.

*Ключевые слова:* контактный дорожный датчик, электрические измерения, толщина водосодержащего слоя, дорожная поверхность.

Табл. 1. Ил. 7. Библ. 4.

УДК 002.5: 551.5: 681.5

**Технология оцифровки данных с бумажных носителей.** Шаймарданов В. М., Колесников А. Е. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 234—245.

Большой объем гидрометеорологической информации все еще хранится на бумажных носителях, поэтому доступ к ней весьма затруднен. Кроме того, бумажные носители при долгом хранении претерпевают физический износ. В связи с этим актуальным является перевод информации в электронный вид. Основным способом перевода данных в электронный вид является сканирование, по возможности с распознаванием.

*Ключевые слова:* данные на бумажных носителях, сканирование, доступ к данным.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 4.

УДК 551.510

**Влияние аномальных погодных условий на формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах России.** Ануфриева А. Ф., Смирнова И. В. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 246—256.

Уровень загрязнения атмосферы в городах создается под воздействием многих факторов. Рассмотрено влияние аномальной жаркой погоды летом 2010 г. на уровень загрязнения в городах и сделана попытка определить связь между увеличением температуры воздуха и ростом концентрации загрязняющих веществ. Показано, что влияние температуры воздуха четко не проявляется из-за увеличения уровня загрязнения в результате поступления в воздух продуктов горения во время пожаров.

*Ключевые слова:* загрязнение атмосферы, концентрация, аномально жаркая погода, температура воздуха.

Табл. 1. Ил. 10. Библ. 6.

УДК 551.510.41; 551.506.9

**Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными судовых наблюдений на шельфе моря Лаптевых).** Решетников А. И., Ивахов В. М. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 257—269.

Проведен сравнительный анализ данных измерений атмосферной концентрации метана на станции Тикси, выполнены ГГО совместно с Финским метеорологическим институтом, с данными измерений концентрации метана в пробах воздуха на шельфе морей восточной части Арктики (ШВСМ), выполненных сотрудниками Тихоокеанского океанологического института. В результате анализа сделан вывод об отсутствии аномальной эмиссии метана, способной привести к значимым изменениям климата в настоящее время.

*Ключевые слова:* метан, вечная мерзлота, Тикси, Арктика, Восточно-Сибирский шельф.

Табл. 3. Ил. 7. Библ. 7.

УДК 551.508:551.585

**Методика квалитетрических оценок воздействий температуры воздуха на технику.** Кожевников Б. Л. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 270—281.

Исследованы источники расхождений физико-химических и экспертных оценок воздействий температуры воздуха на технику; разработана методика квалитетрического расчета нагрузок от этих воздействий по стандартизованным климатическим данным.

*Ключевые слова:* качество атмосферы для техники, погодно-климатические условия, оценка агрессивности, воздействующие климатические факторы, влияние температуры воздуха, методика расчет нагрузок.

Табл. 1. Библ. 15.

УДК 551.509.615

**Оценочные расчеты для разработки метода рассеяния теплых туманов искусственными каплями воды.** Мамучиев И. М. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 282—288.

Проводятся расчетные оценки возможности создания метода активного воздействия на теплые туманы с целью их рассеяния путем распыления воды. В качестве устройства для распыления воды рассматривается переносной лафетный ствол ПЛС-20П.

*Ключевые слова:* туман, активное воздействие, переносной лафетный ствол, вода, капля, рассеяние, взлетно-посадочная полоса.

Табл. 2. Ил. 2. Библ. 9.

УДК 556.06

**Учет климатических изменений при прогнозировании притока воды в Колымское водохранилище на май.** Соколов О. В., Ушаков М. В. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С. 289—297.

На основе регрессионного анализа разработана методика долгосрочного прогноза притока воды в Колымское водохранилище на май. В качестве предикторов использованы месячные индексы атмосферной циркуляции. Показано, что при разработке прогностических моделей в условиях меняющегося климата целесообразно использовать метод скользящей обучающей выборки.

*Ключевые слова:* приток воды, климат, долгосрочный прогноз, регрессионный анализ.

Ил. 4. Библ. 7.

УДК 551.509

**Calibration of probabilistic surface air temperature forecast based on the MGO atmospheric GCM ensemble runs.** Mirvis V. M., Lvova T. Yu., Meleshko V. P., Matyugin V. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 7—25.

Three calibration techniques for probabilistic monthly forecasts of surface air temperature with weekly downscaling over Northern Eurasia are considered. These are nonparametric evaluation of probability with bias correction, parametric evaluation of probability with bias and standard deviation correction and probability evaluation using Bayesian model averaging. Comparison showed apparent advantage of calibration using bias and standard deviation correction and Bayesian model averaging. They both give similar skill.

*Keywords:* ensemble forecast, probabilistic forecast, calibration methods, bayesian model averaging, surface air temperature.

Tab. 2. Fig. 4. Ref. 13.

УДК 552.509

**Estimations the success of operative meteorological forecasts, calculated by multiple-factor regression method for the main agricultural zone of Russia and heighbours countries.** Meshcherskaya A. V., Golod M. P. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 26—41.

The estimates of success of super long forecasts of monthly air temperatures and monthly sum of precipitations, which every year (1998—2011) are calculated with 2—13 months in advance for the main agricultural zone of Russia, Ukraine, Belorussia and North Kazakhstan are presented.

It's shown, that during the last 14 year estimates of operation forecasts mean month temperature consist 68,7 and 50,2 % in accordance with warm (April—September) and cold (October—March) part of year, which on 2,9 and 7,9 % higher, than success of climate forecasts. Between forecasted and observed fields of mean month temperature the coefficient correlation  $r = 0,22$ ; estimate of sign  $\rho = 0,22$ , the mean square error  $\delta = 2,55$  °C.

The forecasts estimates of monthly sum of precipitations are lower, than climatic forecasts.

*Keywords:* success of super long meteorological forecasts; in advance; climatic forecasts.

Tab. 3. Fig. 6. Ref. 15.

УДК 551.465.7, 539.186, 551.576.1

**Air-Sea gas exchange in the Barents Sea (numerical simulation including bubble exchange under the stormy conditions.** Bortkovski R. S., Orlenko L. R., Nadyozhina E. D., Sternsat A. V., Pavlova T. V., Pikaleva A. A., Molkentin E. K., Egorov B. N. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 42—60.

The Barents Sea is thought to absorb a considerable amount of CO<sub>2</sub> from the atmosphere. But current evaluations of air—sea CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> fluxes in the Barents Sea are very uncertain. In order to elucidate the seasonal and spatial variations of air—sea gas fluxes the new version of gas transfer model is used. The climatic data of the Regional Climatic Model (RCM) MGO and of the Global Climatic Model ECHAM are used as input parameters of the gas transfer model. The integrated annual uptake of CO<sub>2</sub> in the Barents Sea is calculated.

*Keywords:* carbon fluxes, oxygen, climate, Barents Sea, gas exchange by bubbles.

Tab. 1. Fig. 4. Ref. 22.

УДК 551.583.001.57:661.97

**On advanced statistical modeling of climate factors impacts on crop yield anomalies.** Menzhulin G. V., Pavlovsky A. A., Savvateyev S. P. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 61—77.

The special technique for assessment the climate change impact on crop productivity anomalies based on the analysis of regression equations ensemble for normalized yield anomalies dependencies on meteorological factors is developed. The examples of its using for estimation of recurrence in the yield anomalies future changes involving one from the climate change scenarios recommended in 4<sup>th</sup> IPCC report are discussed.

*Keywords:* crop yield trends and anomalies, regression modeling, agroclimatic consequences of global climate change.

Tab. 1. Fig. 2. Ref. 13.

УДК 551.583.001.57 :661.97

**Assessments of possible agroclimatic consequences of global warming in north European agricultural regions.** Menzhulin G. V., Pavlovsky A. A., Savvateyev S. P. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 78—93.

The results of calculations the recurrences of abnormal for wheat production years under future climate change in the four regions of Russia, in Swedish and Denmark counties, in UK, Ireland, Finland and Baltic countries are discussed. The new technique based on the multi-variant approach was used. Some "anti-phase" recurrence of unfavorable wheat yield years in different Northern Europe areas is revealed.

*Keywords:* anomalies in grain yields production in European countries, agroclimatic effects of global warming.

Tab. 3. Ref. 14.

УДК 551.5+327+339

**Statistics of daily high temperatures in summer and possible problems of energy supply.** Sall M. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 94—99.

The statistics of daily high summer temperatures in Moscow are discussed. The growing number of days with high temperatures leads to the possible problems with energy supply due to the wide spread of air condition systems. Some economical evaluations are presented.

*Keywords:* air temperature, statistics, economical evaluation.

Tab. 1. Fig. 3. Ref. 5.

УДК 551.5+327+339

**R/S statistics of atmospheric pressure.** Sall M. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 100—105.

The usage of R/S statistics to the study of changes in atmospheric pressure is discussed. Such a numerical characteristic as persistence time is introduced. This time determines the degree of variability of weather in a particular area. Some examples of calculating the fractal dimension of the curve of atmospheric pressure, which can be considered as the degree of determinacy of weather conditions are presented.

*Keywords:* atmospheric pressure, R/S statistics, weather conditional.

Fig. 3. Ref. 3.

УДК 551.5

**Investigation the significance of atmospheric disturbances.** Maiboroda L. A., Divinsky L. I. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 106—115.

It is shown that by using calculated coefficients of significance, all the random factors can be divided into essential and nonessential. Significant factors can be divided into weakly and strongly varying factors. This requires a comparison of the linear and the quadratic models of the function. The condition under which the factor can be considered weakly changing, is presented.

*Keywords:* control of aircraft, atmospheric disturbances, coefficient of nonlinearity, model.

Tab. 2. Ref. 14.

УДК 551.5

**Statistical analysis of nonlinear systems by linear approximation.** Maiboroda L. A., Divinsky L. I. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 116—127.

The possibility of using a linear approximation for the statistical analysis of nonlinear systems is investigated. It is found that the results of studies of the linear model can be effectively used as a first approximation in the study of nonlinear stochastic differential equations, control process of aircraft movement in the atmosphere.

*Keywords:* nonlinear processes, linear model mathematical statistics, methods, control of aircraft.

Ref. 3.

УДК 551.3+519.63

**Some features of liquid water content statistics in shallow convective clouds.** Dovgaluk Yu. A., Ignatyev A. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 128—138.

Numerical simulation of liquid water statistics in shallow convective clouds is carried out using LES model. It is shown that liquid water distribution function is decreasing exponent. It is found that in almost all cases there is a particular point on the liquid water content axis where decreasing rate suddenly changes. This value may be considered as a typical scale of liquid water. The same feature may be found in experimental data also.

*Keywords:* numerical modeling, cumulus clouds fields, LES model, liquid water content, probability distribution function.

Tab. 1. Fig. 5. Ref. 17.

УДК 551.594

**Anomalies of electric field for case of strong earthquake in the Almaty earthquake region.** Salihov N. M., Drobzheva Ya. V., Krasnov V. M., Drobzhev V. I., Zhumabaev B. T. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 139—154.

On the base of experimental data of atmospheric electric field which were obtained before and during Kapchagai earthquake (Kazakhstan) three types of anomalies were detected. To determine the possibility of connection between these data and earthquake process it was analyzed atmospheric electric field and microvariaton of atmospheric pressure data from 3 April 2011 for 15 June 2012. Some connection between electric field anomalies and earthquake process was detected.

*Keywords:* anomalies of atmospheric electric field, microvariaton of atmospheric pressure, earthquake.

Fig. 11. Ref. 6.

УДК.551.594

**The effect of radioactive substances on the structure of the atmosphere's lower electrode surface layer.** Morozov V., Shapkaliyevski M., Orlenko L. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 155—168.

One of the physical problems of the atmosphere's lower electrode surface layer is the effect of radioactive substances to its structure in the limiting case, where the intensity of ionization significantly exceeds the intensity of the ion-formation, due to galactic cosmic rays. To assess this effect one-dimensional stationary model of the electrode surface layer of the atmosphere is used, where it takes into account the turbulent exchanges of the electrical parameters (ion concentration, electric field), and the concentration of radioactive substances. The relation between the intensity of ion formation and concentration of radioactive substances is analyzed. The vertical distribution of ionization rates made by various radioactive substances ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ , and Krypton-85), ion concentration, electrical conductivity and electric field are calculated.

*Keyword:* electrode layer, radioactive substances.

Tab. 3. Fig. 5. Ref. 11.

УДК 551.509

**The influence of humidity on electric and microstructure aerosol characteristics.** Ivlev L. S., Dovgaluk Yu. A. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 169—181.

The effects of the influence of value change of relative humidity on reorganization of microstructure of aerosol and electric characteristics of the air are discussed. Besides the condensation increase of particles the important influence is made by such physical processes as dynamic movements of air masses and selective processes of adsorption of ions on the surface of particles.

*Keywords:* relative humidity, microstructure of aerosol, electric field, light ions, polar conductivity, morphology charge, morphology of particles.

Tab. 2. Fig. 5. Ref. 12.

УДК 551.509: 502.36

**Meteorological-economic model of megapolis meteodefence.** Kozlov V. N., Akselevich V. I., Mazurov G. I. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 182—202.

The potential economic benefits of megapolis meteodefence using active influences on cloud systems against extreme snowfall are considered. The results of calculations estimate the economic effect of a possible meteodefence of Saint-Petersburg at 9—13 of December 2010. The conclusion of the article regards the effectiveness of megapolis meteodefence from extreme snowfall.

*Keywords:* meteodefence, economic benefit, efficiency, meteorological — economic model.

Tab. 5. Fig. 1. Ref. 13.

УДК 551.006.92(47+57)

**Perfection of technologies of meteorological services on the basis of integration of automated meteorological information-measuring systems and networks.** Kondratjuk V. J., Medvedev D. N., Persin S. M. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 203—213.

The questions of formation of uniform flows of meteorological information from the network AWOS and automated meteorological observing network are considered. The comparison of the characteristics of the methods, algorithms and technologies for automated systems of ground-based meteorological network and the network of meteorological support of aerodromes service for aerodrome with the positions of optimization of the process of obtaining the source of meteorological information on the state of the surface layer of the atmosphere is shown.

*Keywords:* flow meteorological data, automated meteorological information-measuring systems, the integration of flows, aggregation technologies.

Ref. 19.

УДК 501.508

**Automatic generation of climatic description of the aerodrome.** Persin S., Aniskin L., Medvedev D., Popov V. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 214—222.

The issues of the automatic formation of climatic characteristics of the aerodrome which are a necessary part of meteorological support for flight operations are reviewed. Technologies and data processing algorithms implemented in the software and hardware complex of the aerodrome meteorological information and measurement system AMIS-RF are described with special emphasis on the creation of data archives over long periods (10 years at least) and the results of their processing and representation (monthly, annual, long-term weather phenomena frequency tables and durations, graphs, charts, etc.).

*Keywords:* airport, aerodrome, meteorological services, automation, climatic characteristics, meteorological parameters and phenomena, archives.

Tab. 1. Fig. 2. Ref. 5.

УДК 551.5

**About measurement of a layer thickness by the road device.** Zimenkov P. S. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 223—233.

The dependence of sensor conductivity of different geometry on the thickness of water-containing layer is calculated with the help of the simplified model of an electrical current running between the electrodes placed on the one hand of the layer.

*Keywords:* contact road device, electrical measurements, the thickness of water-containing layer, road surface.

Tab. 1. Fig. 7. Ref. 4.

УДК 002.5: 551.5: 681.5

**Procedures for digitizing data from paper forms.** Shaymardanov V. M., Kolesnikov A. Ev. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 234—245.

A large amount of hydrometeorological information is still being stored on paper so the access to it is rather difficult. Moreover, hard copies suffer physical wear in long term storage. In this context, conversion of information to electronic format is an actual problem. The main method of data conversion to electronic format is scanning with text recognition when possible.

*Keywords:* data on paper, scanning, data access.

Tab. 1. Fig. 2. Ref. 4.

УДК 551.510

**Influence of anomalous weather conditions on the formation of atmospheric pollution level in Russian cities.** Anufrieva A. F., Smirnova I. V. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 246—256.

The level of air pollution in cities is created under the influence of many factors. The effect of anomalous hot weather in summer of 2010 year at the level of air pollution in cities was examined. The attempt was made to define the relationship between the air temperature increase and increasing concentrations of pollutants. It is shown that the effect of temperature is not clearly seen because of the increased level of air pollution from the air entering the combustion products during the fires.

*Keywords:* air pollution, concentration, anomalous hot weather, air temperature.

Tab. 1. Fig. 10. Ref. 6.

УДК 551.510.41; 551.506.9

**The results of continuous observation of methane concentration in Tiksi (comparison with the data of ship observations on the Laptev Sea shelf).** Reshetnikov A. I., Ivakhov V. M. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 257—269.

The comparative analysis of data on atmospheric methane concentration has been measured by Main Geophysical Observatory and Finnish Meteorological Institute in Tiksi with CH<sub>4</sub> data received on a shelf of the East Siberian seas (SESS) by the staff of Pacific Oceanological Institute is carried out. As a result of the analysis the conclusion about absence of anomalous methane emission on the SESS which could cause a catastrophe is drawn.

*Keywords:* methane, permafrost, Tiksi, Arctic, East Siberian shelf.

Tab. 3. Fig. 7. Ref. 7.

УДК 551.508:551.585

**Qualimetric evaluation methods of the influence of air temperature on technical equipment.** Kozhevnikov B. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 270—281.

The reasons of discordance of physicochemical and expert assessments of the influence of air temperature on technical equipment are analyzed. The qualimetric calculation method of the load of this influence based on standardized climatic data is elaborated.

*Keywords:* quality of the atmosphere for technical equipment, weather and climate conditions, aggressiveness evaluation, influencing climatic factors, influence of air temperature, load calculation method.

Tab. 1. Ref. 15.

УДК 551.509.615

**Estimated accounts for development of a method of dispersion of warm fogs by artificial drops of water.** Mamuchiev I. M. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 282—288.

The settlement estimations of an opportunity of creation of a method of active influence on warm fogs with the purpose of their dispersion by dispersion of water are presented. As the device for dispersion of water is considered portable trunk ИИЖС-20И.

*Keywords:* fog, active influence, portable trunk, water, drop, dispersion, runway.

Tab. 2. Fig. 2. Ref. 9.

УДК 556.06

**Inclusion of climate change in predicting the water inflow in the Kolyma reservoir in may.** Sokolov O., Ushakov M. Proceedings of MGO. 2012. V. 566. P. 289—297.

Based on the regression analysis, the technique of long-term prediction of water inflow into the reservoir Kolyma in May was obtained. The monthly indices of atmospheric circulation are used as the predictors. It is shown that the method of moving teaching sampling retrieval is to be used to develop the prognostic models in a changing climate.

*Keywords:* inflow, climate, long-term forecast, regression analysis.

Fig. 7. Ref. 4.

Сборник научных трудов

**Труды ГГО. Вып. 566**

Подписано в печать 20.11.2012. 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.

*Уважаемые читатели!*

*Подписаться на научно-технический журнал «Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова» вы можете по каталогу «Роспечать» во всех отделениях связи.*

*Подписной индекс – 18617.*

*Индекс 18617  
по каталогу Роспечати  
«Газеты. Журналы»*