

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск
564

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

Санкт-Петербург
2011

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

УДК 551.5 (09)

Редакционная коллегия

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

Содержатся результаты теоретических и экспериментальных исследований по современным проблемам изменения климата и прогноза погоды, атмосферной диффузии и мониторинга состояния атмосферы, климатологии, дистанционного зондирования атмосферы.

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

Рекомендуется аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

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

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

Editorial board

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

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

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

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

© Государственное учреждение «Главная
геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова»,
2011

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Т. В. Павлова, В. М. Катцов, В. А. Говоркова.</i> Морской лед в моделях СМIP5: ближе к реальности?.....	7
<i>В. И. Кондратюк.</i> Модернизация метеорологической сети Росгидромета.....	19
<i>Т. П. Светлова.</i> О применении международных стандартов ИСО для повышения качества измерений на государственной наблюдательной сети	40
<i>Л. В. Луцько, Е. Л. Махоткина.</i> О модернизации актинометрической сети.....	51
<i>А. А. Пикалёва.</i> Модельные оценки влияния режима увлажнения почвы на эволюцию естественной эмиссии метана с территорий избыточного увлажнения в Сибири	66
<i>А. К. Семендяев.</i> Численная схема мониторинга динамики запасов продуктивной влаги и составляющих углеродного баланса органического вещества пахотных почв	89
<i>А. А. Игнатьев.</i> LES модель полей конвективных облаков	104
<i>Ю. А. Довгалюк, А. А. Игнатьев.</i> К использованию LES модели для исследования характеристик полей кучевых облаков	126
<i>Ю. Б. Ржонсницкая.</i> Моделирование направленного рассеяния излучения сферически неоднородной частицей	147
<i>Л. П. Галюк, Н. В. Кобышева, Н. Рыбалка.</i> Оценка «риска доверия» климатическому прогнозу методом нечеткой логики	155
<i>В. М. Шаймарданов.</i> Организация контроля качества информации, включаемой в фонд данных	166
<i>Е. А. Самукова, Н. И. Смирнова.</i> Контроль качества актинометрической информации в Мировом центре радиационных данных	178
<i>Е. В. Иванова, В. Э. Ницис.</i> Специализированные характеристики интенсивности осадков, применяемые в ЕС для проектирования систем отведения дождевых вод	196
<i>Т. П. Светлова.</i> Об обеспечении единства измерений и требований к метеорологическим измерениям в натуральных условиях окружающей среды	205

<i>Б. Л. Кожевников.</i> О комплексной оценке погодно-климатических условий при многокомпонентных загрязнениях воздуха	217
<i>А. И. Решетников, А. В. Зинченко, Н. Н. Парамонова, В. И. Привалов, В. М. Ивахов, К. В. Казакова.</i> Результаты мониторинга основных парниковых газов на арктических станциях Росгидромета	223
<i>Р. А. Круглов, А. В. Дробинская.</i> Сравнительный анализ алгоритмов статистической обработки результатов инструментальных измерений высоты нижней границы облаков применительно к задаче краткосрочного прогноза характеристик облачности при метеорологическом обеспечении взлета/посадки воздушных судов	241
<i>Г. И. Мазуров, В. Н. Козлов, В. И. Акселевич.</i> Создание искусственных облачных образований с целью изменения экстремальных температур (обзор).....	251
<i>А. А. Воронин.</i> Коррекция магнитометрических данных, полученных с борта метеорологического геостационарного спутника «Электро»	268
Оперативно-производственное совещание «Модернизация метеорологической сети, результаты, проблемы, пути решения»	279
Владимир Михайлович Катцов.....	283
Дмитрий Петрович Беспалов.....	286
Андрей Александрович Синькевич	288
Памяти К. С. Шифрина	290

CONTENTS

<i>T. V. Pavlova, V. M. Kattsov, V. A. Govorkova.</i> Sea ice in CMIP5 models: closer to reality?	7
<i>V. I. Kondratuk.</i> Modernization of a meteorological network: conclusion and results	19
<i>T. P. Svetlova.</i> About application of international standards ISO for improvement of quality of measurements on the state observant network	40
<i>L.V. Lutsko, E. L. Makhotkina.</i> Modernization of a aktinometrical network	51
<i>A. A. Pikaleva.</i> Modeling assessments of soil moisture influence on the evolution of natural methane emissions from Siberian wetlands	66
<i>A. K. Semendyaev.</i> Numerical scheme for monitoring the dynamics of available moisture reserves and carbon balance components of organic matter in arable soils.....	89
<i>A. A. Ignatyev.</i> LES model of the cumulus cloud fields.....	104
<i>Yu. A. Dovgaluk, A. A. Ignatyev.</i> To LES model usage for investigation of the cumulus cloud fields.....	126
<i>J. B. Rzhonsnitskaya.</i> Simulating of angular light scattering by inhomogeneous spherical particle	147
<i>L. P. Galuk, N. V. Kobysheva, N. Pibalko.</i> The assessment of climate model results credibility using the fuzzy-set theory	155
<i>V. M. Shaimardanov.</i> Organization of quality control of information including in the data fund.....	166
<i>E. A. Samukova, N. I. Smirnova.</i> Quality control of radiometric information at the World Radiation Data Center.....	178
<i>E. V. Ivanova, V. E. Nizis.</i> Specialized indexes of rain intensity for use in water disposal system projecting in EU	196
<i>T. P. Svetlova.</i> About maintenance of unity of measurements and requirements to meteorological measurements in natural conditions of environment	205
<i>B. L. Kozhevnikov.</i> The integrate assessment for the aggressiveness of weather and climate conditions under multi-component air pollution ...	217

<i>A. I. Reshetnikov, A. V. Zinchenko, N. N. Paramonova, V. I. Privalov, V. M. Ivakhov, K. V. Kazakova.</i> Results of main greenhouse gases monitoring at Arctic stations of Rosgidromet.....	223
<i>R. A. Kruglov, A. V. Drobinskaya.</i> The comparative analysis of algorithms of statistical processing of results of the instrumental measurements of height of the cloud base with reference to a problem of the short-term forecast of characteristics of overcast at meteorological maintenance of takeoff/landing of aircrafts.....	241
<i>G. I. Mazurov, V. N. Kozlov, V. I. Akselevich.</i> The creation of artificial cloud formations, aimed at leveling extreme temperatures.....	251
<i>A. A. Voronin.</i> Correction of Geomagnetic Data Measured Onboard Meteorological Geostationary Satellite “Electro”.....	268
Workshop «Modernization of a meteorological network results, problems, solutions»	279
Vladimir Mikhaylovich Kattsov	283
Dmitry Petrovich Bepalov	286
Andrey Aleksandrovich Sinkevich	288
In memory K.S. Shifrin	290

УДК 551.583

**МОРСКОЙ ЛЕД В МОДЕЛЯХ СМIP5:
БЛИЖЕ К РЕАЛЬНОСТИ?**

Т. В. Павлова, В. М. Катцов, В. А. Говоркова

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

Поступила в редакцию 3.11.2011

В очередном, Пятом оценочном докладе Первой рабочей группы Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), публикация которого намечена на 2013 г., предполагается использовать результаты расчетов эволюции климата в 20-м и 21-м веках (и на более отдаленную перспективу) с помощью климатических моделей нового поколения, разработанных в ведущих исследовательских центрах мира. С целью научного обеспечения подготовки Пятого доклада МГЭИК Всемирная программа исследований климата инициировала пятую фазу Международного проекта сравнения объединенных моделей СМIP5 (Taylor et al., 2009). Формат этого проекта существенно расширен по сравнению с предыдущей фазой — СМIP3, обеспечившей подготовку Четвертого доклада МГЭИК (2007 г.). В частности, помимо традиционных ансамблевых расчетов климата 19—21-го веков, климатические центры проводят серию расчетов на десятилетия с инициализацией в определенные годы второй половины 20-го — начала 21-го века.

Реализация экспериментальной части СМIP5 предполагает генерирование моделями беспрецедентного объема данных — в общей сложности порядка петабайта (против десятков терабайт СМIP3). Это увеличение является следствием расширения списка запланированных экспериментов, а также увеличения числа моделей, их пространственного разрешения и временной дискретизации архивируемых данных (суточного и более высокого разрешения).

Модельные данные архивируются в Ливерморской лаборатории США и предоставляются участникам диагностической части CMIP5, в число которых входят и авторы настоящей работы.

Диагностические проекты CMIP5 обещают еще большее тематическое разнообразие, чем около 1200 проектов CMIP3. В настоящее время для анализа доступны данные примерно половины моделей, заявленных в «долгосрочной» (на сотни лет) категории экспериментов CMIP5. Это количество позволяет получить предварительные оценки качества воспроизведения ансамблем моделей различных аспектов наблюдаемого состояния климатической системы.

Настоящая работа посвящена анализу воспроизведения моделями CMIP5 некоторых характеристик ледяного покрова Мирового океана — в сравнении с моделями CMIP3, детально рассматривавшимися рядом авторов, в том числе в работе Катцова и др. (2007).

В настоящем исследовании были проанализированы результаты расчетов морского льда с помощью 16 моделей CMIP5: BCC-CSM1.1 (Китай); CanESM2 (Канада); CSIRO-Mk3.6 (Австралия); GISS-E2-H и GISS-E2-R (США); HadGEM2-ES, HadGEM2-CC и HadCM3 (Великобритания); INM-CM4 (Россия); CNRM-CM5 и IPSL-CM5A-LR (Франция); MIROC4h, MIROC5, MIROC-ESM и MRI-CGCM3 (Япония); NorESM1-M (Норвегия).

Для сопоставления географических распределений морского льда между моделями и с данными наблюдений модельные данные CMIP5 были переинтерполированы из исходных сеток моделей в регулярные широтно-долготные сетки 1×1 и $2,5 \times 2,5^\circ$.

Был использован также ансамбль из 17 моделей CMIP3: BCCR-BCM2.0 (Норвегия); CGCM3.1(T47) и CGCM3.1(T63) (Канада); CSIRO-Mk3.0 (Австралия); ECHAM5/MPI-OM (Германия); CCSM3, GISS-AOM, GISS-ER и PCM (США); INM-CM3.0 (Россия); CNRM-CM3 и IPSL-CM4 (Франция); MIROC3.2 (hires), MIROC3.2 (medres) и MRI-CGCM2.3.2 (Япония); UKMO-HadCM3 и UKMO-HadGEM1 (Великобритания). Этот ансамбль, так же как и рассматриваемый ансамбль CMIP5, формировался не в результате целенаправленного отбора моделей, но включал все доступные к мо-

менту завершающей стадии подготовки доклада модели, исключая лишь одну, известную чрезвычайно низким качеством расчетов.

Таким образом, два сопоставляемых в настоящем исследовании ансамбля — CMIP3 и CMIP5 — формировались случайным образом, без дискриминации, а их репрезентативность полагается достаточной для проведенного анализа. Гипотеза о репрезентативности ансамбля CMIP5 может быть проверена после того, как станут доступными данные остальных полутора десятка моделей, однако представляется вполне обоснованной как рабочая. В некоторых случаях использовалось меньшее (но не меньше 12) число моделей, например когда было необходимо одинаковое число моделей CMIP3 и CMIP5 (см. рис. 1 и 2) для сравнения с Четвертым докладом МГЭИК (см. рис. 8.1 в работе Randall et al. (2007)) или когда продолжительность временного ряда результатов расчетов для некоторых моделей была меньше, чем необходимо для сравнения с другими моделями (см. рис. 5 и 6).

Оценка качества воспроизведения среднего состояния и эволюции ледяного покрова Мирового океана климатическими моделями требует наличия основанной на данных наблюдений достоверной информации о глобальном распределении таких характеристик морского льда, как его сплоченность, толщина, скорость, соленость, снежный покров и др. К сожалению, надежная количественная оценка большинства перечисленных характеристик не обеспечивается современными системами наблюдений, по крайней мере в глобальном масштабе. Наиболее пригодными для сопоставления с модельными расчетами остаются измеряемая с помощью спутников сплоченность морского льда и получаемые на основе этих измерений интегральные оценки площади ледяного покрова. В то же время, недостаток данных о распределении толщины ледяного покрова океана остается камнем преткновения для оценки качества ледовых компонентов климатических моделей.

В настоящем анализе использованы два источника данных, основанных на наблюдениях за сплоченностью морского льда: Центра Хэдли (HadISST), Великобритания (Rayner et al., 2003) и Национального центра данных о снеге и льде (NSIDC), США

(Fetterer et al., 2002). Точность алгоритмов восстановления данных установленных на спутниках пассивных микроволновых (ПМВ) датчиков для оценки площади и сплоченности морского льда анализировалась в ряде работ (например, Meier and Stroeve (2008)). Различия в полученных на основе разных алгоритмов интегральных оценках площади морского льда достигают 1 млн км² (см., например, рис. 2 в работе Катцова с соавторами (Kattsov et al., 2011)). При этом тренды и аномалии в разных ПМВ продуктах, как правило, согласуются лучше, чем абсолютные значения площади.

В Четвертом докладе МГЭИК в качестве одного из важных усовершенствований климатических моделей (СМIP3) отмечено включение описания динамических процессов в ледяном покрове океана. Что касается ледовых компонентов моделей СМIP5, то внесенные в них усовершенствования по отношению к моделям СМIP3, если и имели место, то не носили столь драматического характера. Совокупная картина распределения морского льда в обоих полушариях для ансамбля СМIP5 (рис. 1), на первый взгляд, не сильно отличается от соответствующего распределения для СМIP3 (см. рис. 8.10 в работе Randall et al. (2007)) даже при том, что она построена для нового базового периода МГЭИК (1986—2005 гг.), смещенного на шесть лет по отношению к прежнему (1980—1999 гг.).

Однако разность между ансамблями СМIP5 и СМIP3 для периода 1980—1999 гг. (рис. 2) указывает на то, что условная «средняя граница» морского льда в ансамбле СМIP5 несколько отступила к полюсам в обоих полушариях как в холодный, так и в теплый сезон. Исключение составляет лишь североатлантический сектор Арктики, в котором ансамбль СМIP5 генерирует несколько больше морского льда, нежели СМIP3.

Несмотря на существенные различия между моделями СМIP5, рассматриваемый ансамбль в среднем хорошо согласуется с данными наблюдений в обоих полушариях. Средняя по ансамблю площадь льда, оцениваемая как площадь модельных ячеек, в которых сплоченность льда составляет не менее 15 %, отличается от наблюдаемых значений примерно на 1 млн км² в холодные сезоны как в Северном, так и в Южном полушарии, завышая и за-

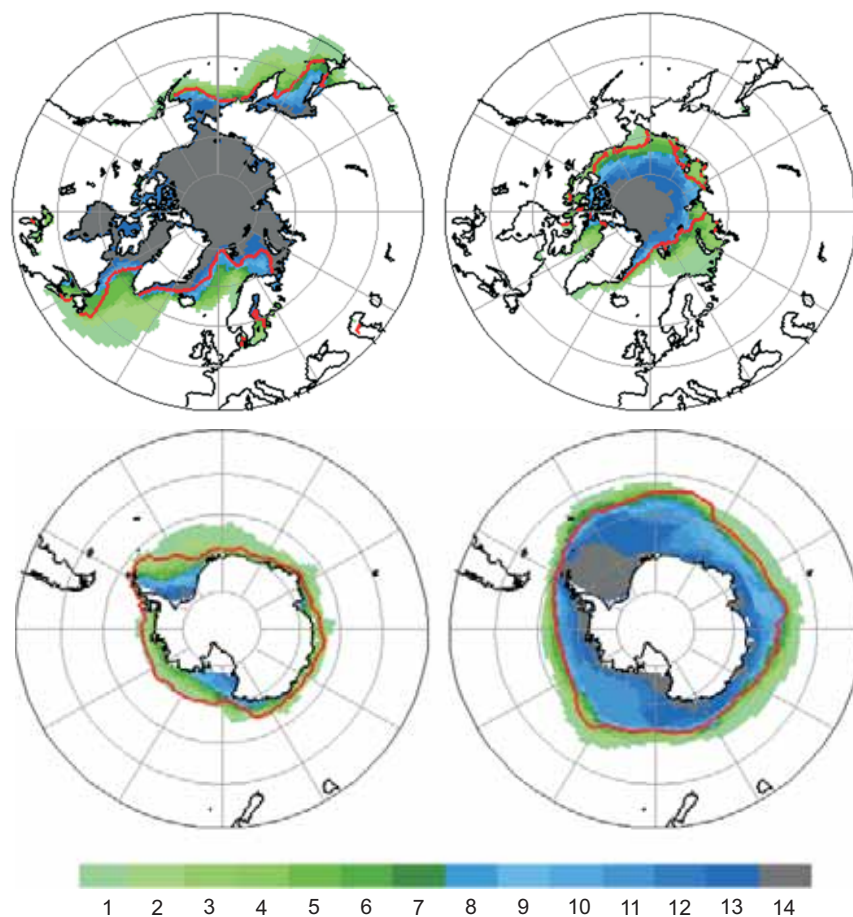


Рис. 1. Распределение морского льда в Северном (вверху) и Южном (внизу) полушарии для марта (слева) и сентября (справа) в расчетах с 14 моделями СМIP5 за период 1986—2005 гг. в ячейках широтно-долготной сетки $1 \times 1^\circ$. В каждой ячейке в соответствии с цветовой шкалой представлено число моделей, в которых для этой ячейки получен лед сплоченностью не менее 15 %. Наблюдаемые границы ледяного покрова сплоченностью не менее 15 % (красная линия) за период 1986—2005 гг. получены по данным HadISST (Rayner et al., 2003).

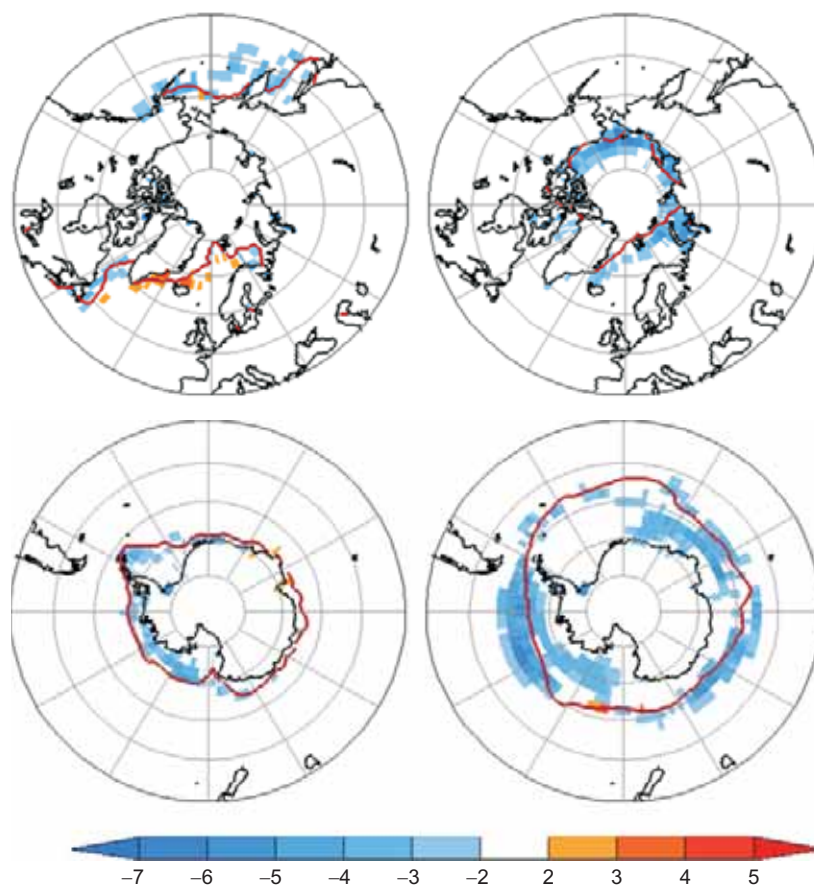


Рис. 2. Разность распределений морского льда в Северном (вверху) и Южном (внизу) полушарии для марта (слева) и сентября (справа) между ансамблями СМІР5 и СМІР3 за период 1980—1999 гг. в ячейках широтно-долготной сетки $2,5 \times 2,5^\circ$.

Пояснения к цветовой шкале см. рис. 1.

нижая ее соответственно (рис. 3). Эти отклонения не представляются слишком большими, если учесть вышеупомянутый разброс между различными спутниковыми оценками. Следует отметить, однако, что в ряде моделей региональные особенности распределения морского льда воспроизводятся плохо, даже если суммарная площадь близка к наблюдаемой. Обращает на себя внимание и то обстоятельство, что рассматриваемый ансамбль СМIP5 в среднем лучше воспроизводит площадь морского льда в Северном полушарии, нежели СМIP3, особенно в теплый сезон.

Одной из широко обсуждавшихся в научной литературе особенностей моделей СМIP3 была их предположительная «консервативность» с точки зрения воспроизведения значительного тренда площади льда в Северном полушарии (особенно, его сентябрьского минимума). Действительно, за период спутниковых, т. е. наиболее надежных, наблюдений за ледяным покровом Мирового океана площадь сентябрьского льда в Северном Ледовитом океане сокращается с ускорением, и к 2011 г. скорость этого сокращения по отношению к периоду 1979—2000 гг. составила 12 % за десятилетие (рис. 4). В то же время, модели СМIP3 в среднем по ансамблю показывали существенно меньшее значение.

В работе Катцова с соавторами (Kattsov et al., 2011) обсуждаются возможные причины указанной «консервативности» моделей СМIP3. В числе прочих затрагивается вопрос о том, насколько от моделей, в принципе, следует ожидать воспроизведения времени быстрого сокращения площади морского льда, коль скоро соотношение внешнего воздействия (антропогенного потепления) и собственной изменчивости климатической системы в этом случае не оценено. При этом отдельные модели СМIP3 демонстрируют способность генерировать значительную изменчивость ледяного покрова океана, включая эпизоды резкого сокращения площади морского льда.

Модели СМIP5 довольно заметно различаются амплитудой генерируемой ими изменчивости площади морского льда. В то же время, большинство из них (две трети) достигает максимального отрицательного тренда в первое десятилетие 21-го века (рис. 5).

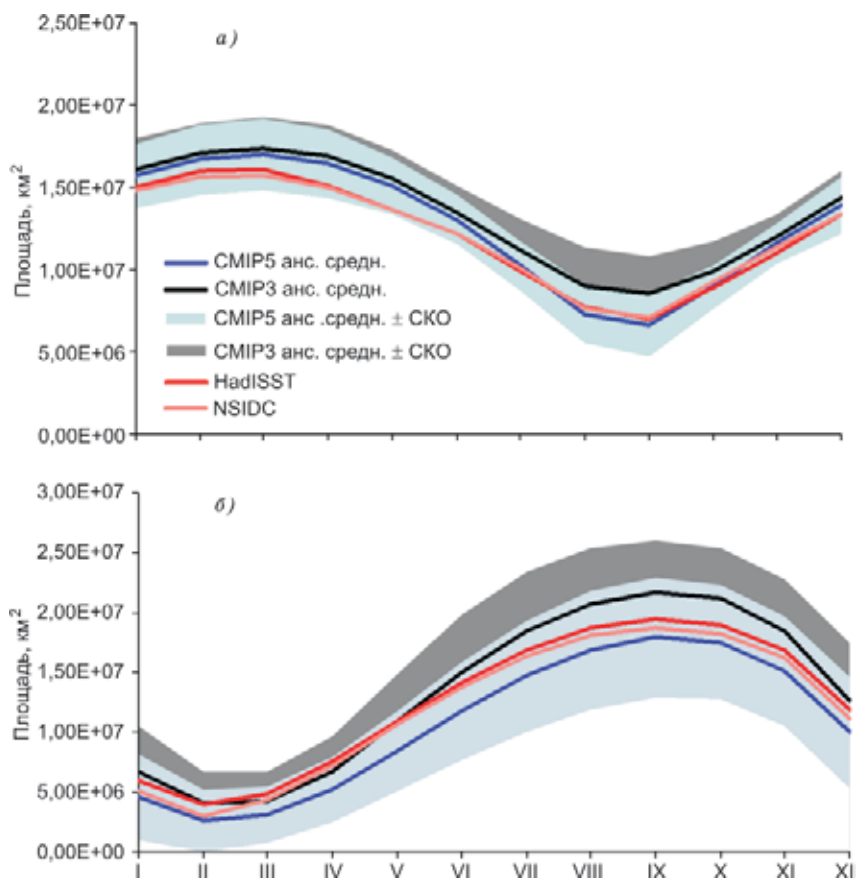


Рис. 3. Средний многолетний (1980—1999 гг.) сезонный ход площади морского льда сплоченностью более 15 % в Северном (а) и Южном (б) полушарии: полученный в ансамблях CMIP5 и CMIP3, а также по данным наблюдений HadISST (Rayner et al., 2003) и NSIDC (Fetterer et al., 2002). Тонем показаны области, соответствующие среднему квадратическому отклонению (СКО) членов ансамблей от средних по ансамблям CMIP5 и CMIP3.

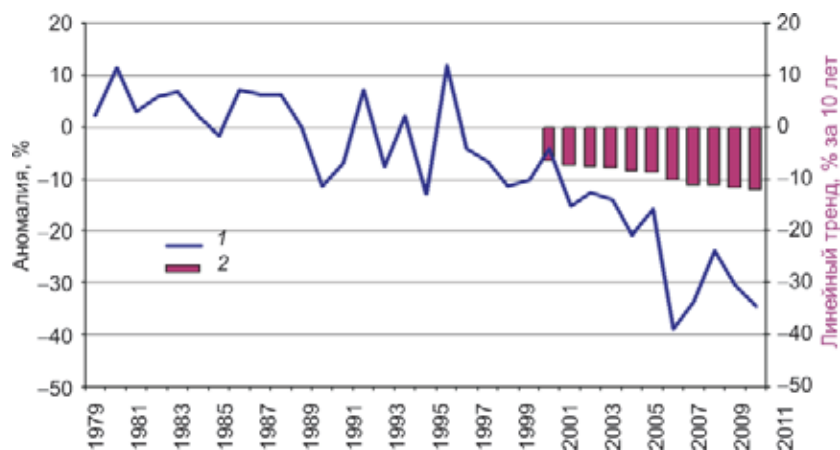


Рис. 4. Аномалия (1) площади морского льда в сентябре в Северном полушарии (в долях (%) среднего значения за 1979—2000 гг.) и линейный тренд (2) за нарастающий период: 1979—2001, 1979—2002, ..., 1979—2011 гг. (по данным NSIDC).

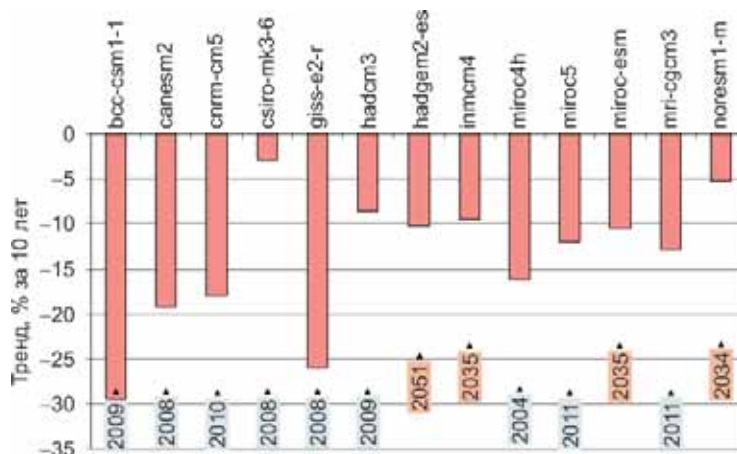


Рис. 5. Максимальный отрицательный тренд площади морского льда в Северном полушарии в сентябре для скользящего тридцатилетия за период 1850—2011 гг. (в долях (%) за десять лет) от среднего за 1979—2000 гг.).

Для каждой модели указан год достижения максимального тренда.

При этом в половине из них величина этого тренда достигает значения наблюдаемого тренда (12 % за десятилетие) или превышает его (в нескольких случаях существенно).

В среднем ансамбль из 12 моделей CMIP5 довольно точно воспроизводит наблюдаемый в последние десятилетия тренд сентябрьской площади морского льда в Северном полушарии (рис. 6). Как видно, говорить о «консервативности» моделей уже не приходится.

Несмотря на кажущийся прорыв в воспроизведении наблюдаемых особенностей эволюции морского льда в Северном полушарии, остаются открытыми некоторые вопросы, которые следует иметь в виду при последующем, более тщательном анализе результатов CMIP5, и прежде всего: является ли полученное улучшение

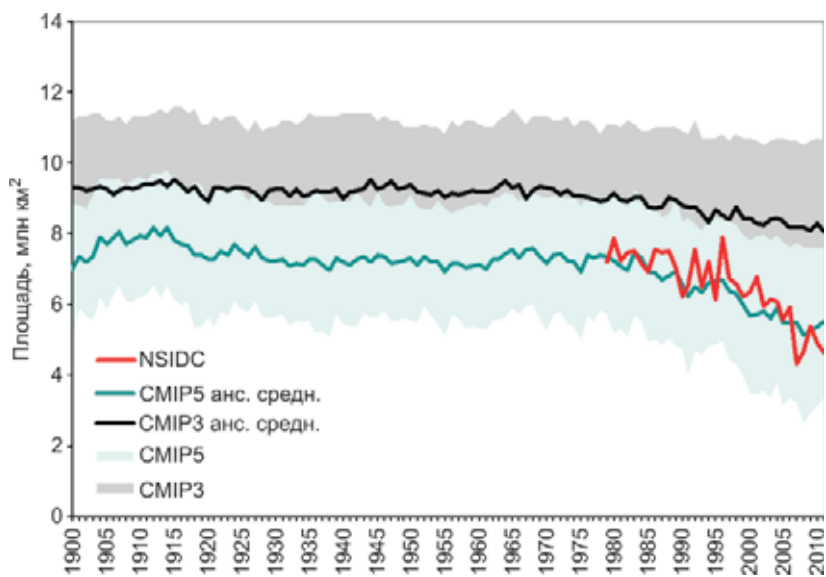


Рис. 6. Площадь морского льда в Северном полушарии по данным наблюдений NSIDC, средняя по ансамблю из 12 моделей CMIP5, средняя по ансамблю из 12 моделей CMIP3. Тонем показано СКО для обоих ансамблей.

Представлены средние оценки для сентября, не годовые минимумы.

устойчивым (робастным) свойством ансамбля CMIP5? Если да, то за счет чего было достигнуто это улучшение? Однако главный вопрос заключается в следующем: если модели CMIP5 в среднем столь успешно воспроизводят наблюдаемый тренд, означает ли это, что он в существенно большей степени является результатом внешнего воздействия на климатическую систему (антропогенного потепления), нежели собственной изменчивости климатической системы?

Настоящая работа выполнена в рамках ЦНТП-3 Росгидромета, а также при поддержке РФФИ (гранты № 11-05-00734 и 09-05-00814). Авторы благодарят д-ра Флориана Раузера (Метеорологический институт Макса Планка, Германия) за консультацию по интерполяции модельных данных, а также П. В. Спорышева (ГГО) за обсуждение рукописи. Авторы признательны международному сообществу разработчиков климатических моделей за предоставление данных для анализа; участникам Программы диагноза и сравнения климатических моделей (PCMDI) за сбор и хранение модельных данных CMIP5; Рабочей группе по объединенным моделям (WGCM) Всемирной программы исследований климата (WCRP) за организацию деятельности по анализу модельных расчетов. Архив данных WCRP CMIP5 поддерживается управлением науки министерства энергетики США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Катцов В. М., Алексеев Г. В., Павлова Т. В., Спорышев П. В., Бекряев Р. В., Говоркова В. А. (2007). Эволюция ледяного покрова Мирового океана в 20-м и 21-м веках в расчетах с глобальными климатическими моделями нового поколения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43, № 2. С. 1—17.

Fetterer, F., K. Knowles, W. Meier, M. Savoie (2002). Sea ice index. Boulder, Colorado USA, National Snow and Ice Data Center.

Kattsov, V., V. Ryabinin, J. Overland, M. Serreze, M. Visbeck, J. Walsh, W. Meier, and X. Zhang (2011). Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science // J. Glaciol. V. 56, No. 200. P. 1115—1121.

Meier, W. N., and J. Stroeve (2008). Comparison of sea ice extent and ice edge location estimates from passive microwave and enhanced-resolution scatterometer data // *Annals of Glaciol.* V. 48(1). P. 65—70. doi:10.3189/172756408784700743.

Randall, D. A., R. A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R. J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor (2007). Climate models and their evaluation / *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA. P. 589—662.

Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P. et al. (2003). Global analysis of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geoph. Res.* V. 108(D14). doi:10.1029/2002JD002670.

Taylor K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl (2009). A summary of the CMIP5 Experiment Design. http://cmip-pemdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_desing.pdf.

УДК 551 006.92 (47+57)

**МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ
РОСГИДРОМЕТА**
**Научно-методическое и организационное обеспечение
Проекта модернизации сети**

В. И. Кондратюк

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

Поступила в редакцию 15.09.2011

Введение

Модернизация — изменение, усовершенствование чего-либо соответственно требованиям современности, например модернизация оборудования, модернизация технологического процесса; модернизация — осовременивание чего-либо (Новый словарь иностранных слов, 2008).

При обсуждении предварительного решения о модернизации метеорологической сети предполагалось закупить и поставить на сеть новые современные автоматизированные средства измерений (СИ) и вывести из эксплуатации выработавшие свой ресурс (нередко дважды, трижды продленный), устаревшие морально и физически табельные СИ. Однако по мере погружения в тему стало ясно, что не обойтись без модернизации связного оборудования и источников энергообеспечения. В то же время, современные автоматизированные СИ, в отличие от персонала наблюдательных подразделений с их табельными СИ, позволяют получать измеряемые характеристики в непрерывном режиме, что заставило задуматься о модернизации технологии метеорологических наблюдений.

Изменение же технологии наблюдений, подкрепленное внедрением современных телекоммуникационных систем, влечет за собой изменение технологии сбора и передачи оперативных и ре-

жимных сообщений. Последняя, в свою очередь, позволяет критически посмотреть на десятилетиями бережно оберегаемые специалистами от резких изменений форматы сбора, обобщения и хранения наблюдаемой информации.

Перечисленные проблемы и возможности, обусловленные модернизацией метеорологической сети, таким образом, существенно расширили понятие «модернизация сети». В связи с этим, имея в виду реализуемый проект модернизации метеорологической сети, правильнее говорить о глубоком обновлении и приведении к современному уровню средств измерений, технологии наблюдений (измерений), сбора, передачи и хранения результатов наблюдений в системе Росгидромета.

Расширенное толкование понятия «модернизация сети», к сожалению, не получило финансовой поддержки, что в конечном счете привело к перекосам в финансировании отдельных и чрезвычайно важных видов работ. В частности, практически не финансировались работы УГМС по монтажу АМК, АМС, не предусматривается финансирование мероприятий по обеспечению сохранности установленного оборудования, по разработке новых технологий производства наблюдений, сбора, передачи и хранения результатов наблюдений автоматизированной сети и т. д.

Краткая оценка состояния метеорологической сети до начала модернизации

Метеорологическая сеть России достигла максимального развития в 1986 г., когда число станций, производящих метеорологические наблюдения, составило 2308. Однако в сентябре 1986 г. появилось известное Постановление Совета Министров СССР о переводе бюджетной сферы (в основном за счет внутренних резервов) на новые условия оплаты труда. В поисках источников финансирования организации наблюдательной сети (ОНС) Росгидромета пошли по пути сокращения метеорологических наблюдательных подразделений (НП), прежде всего в районах с относительно «избыточным» числом НП (станций и постов). Поскольку

таких районов на территории России оказалось слишком мало, в «ход пошли» НП, расположенные в регионах с редкой сетью, в том числе в Арктике, на Чукотке, Камчатке, в северных районах азиатских УГМС. В результате за неполных три года метеорологическая сеть сократилась почти на 20 %.

Затем началась перестройка, плавно перешедшая в демократию «лихих» 90-х. Заботы государства о гидрометеослужбе страны отошли на второй план: из-за хронического недофинансирования стали закрываться метеорологические НП, прекратилась закупка новых средств измерений, что не замедлило сказаться на состоянии их парка, резко сократился приток в гидрометслужбу молодых специалистов, наиболее активные специалисты стали ее покидать в поисках более высоко оплачиваемой работы. За каких-то 10 лет метеорологическая сеть Росгидромета сократилась еще на 10 %, а в Арктике — на 20 % (рис. 1).

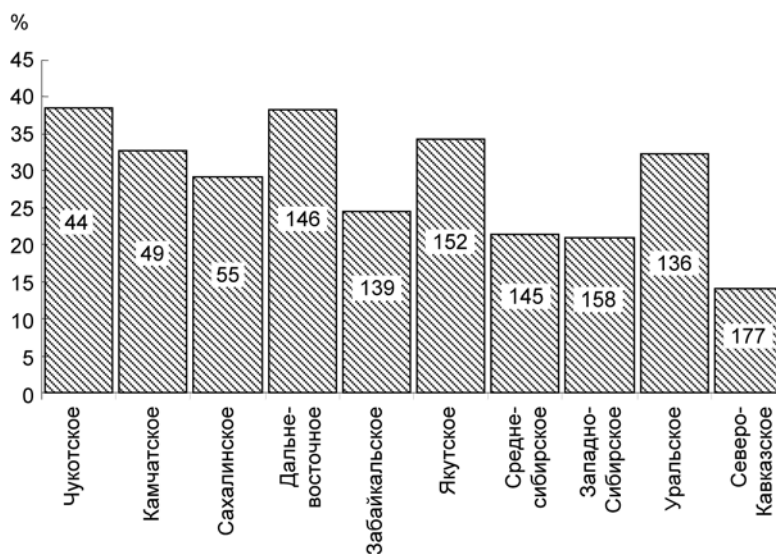


Рис. 1. Уменьшение числа метеорологических НП к 2005 г. по сравнению с 1986 г. в отдельных УГМС.

Цифры в столбцах — максимальное число НП (1986 г.).
Общее уменьшение по Росгидромету — 29 %.

Существенное сокращение числа метеорологических НП привело к тому, что плотность сети пунктов метеорологических наблюдений России, и ранее не самая высокая, стала заметно меньше, чем в развитых странах.

К середине 2000-х годов средний по Росгидромету индекс плотности сети метеорологических НП равнялся 0,10 (одна станция на 10,5 тыс. км²), в то время как для оптимальной сети, по рекомендациям ВМО, он должен быть не менее 0,40 (одна станция на 2,5 тыс. км²). По территории России индекс плотности метеорологических НП колеблется в широких пределах: от 0,4—0,5 в Сахалинском УГМС и Калининградском ЦГМС до 0,03—0,04 в Якутском, Чукотском и Среднесибирском УГМС (для сведения: в Великобритании, Швеции, Японии, Республике Корея и ряде других стран он достигает 1,0—1,1).

Метеорологическая сеть России многие годы довольствовалась малым: весьма скромные даже для России зарплаты персонала НП, простейшие и устаревшие СИ, ненадежные средства связи и энергообеспечения, преобладание ручного труда, отсутствие бытовых удобств в большинстве НП. Тем не менее разрыв между объемом бюджетного финансирования функционирования сети и реальными потребностями не сокращался, а увеличивался, так как изнашивались СИ, ветшали служебные помещения и т. п.

К настоящему времени устарела и система низовой связи: для передачи в основном используются обыкновенная телеграфная и междугородняя телефонная связь или каналы радиосвязи. Передача информации по радио с труднодоступных станций осуществляется вручную — кодом Морзе или в телефонном режиме.

Методики измерений метеорологических величин, основанные на применении устаревших СИ, и используемые технологии передачи наблюдаемых данных объективно являлись тормозом развития наземной метеорологической сети. В результате как по плотности, так и по техническому оснащению пунктов наблюдений метеорологическая сеть Росгидромета к началу XXI века стала несопоставима с метеорологическими сетями национальных метеослужб развитых стран Запада, где в это время ускоренными тем-

пами проводилась автоматизация метеорологических наблюдений, которая к настоящему времени там практически завершена.

Организационно-финансовые подходы к обеспечению модернизации сети

Для того чтобы обеспечить выполнение требований ФЗ № 113 «О гидрометеорологической службе» в части сопоставимости национальной системы наблюдений с международными системами и не оказаться в арьергарде национальных гидрометеослужб (НГМС) мира, была необходима тотальная модернизация наблюдательных сетей Росгидромета.

Потребности мирового метеорологического сообщества в своевременном получении с территории России достоверной метеорологической информации стали дополнительным стимулом для организационно-финансовой поддержки в решении задач программы модернизации метеорологической сети России.

Росгидромет, осознавая критичность ситуации на наземной наблюдательной сети и ссылаясь на опыт НГМС ряда стран, настойчиво добивался от Правительства РФ выделения дополнительных средств на модернизацию метеорологических наблюдений. И такое решение Правительством РФ было принято: 28 ноября 2005 г. между Министерством финансов Российской Федерации, Росгидрометом и Фондом «Бюро экономического анализа» (БЭА) был подписан Договор № 01-01-06/04-154 о реализации проекта «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета». На финансирование Проекта выделялось около 3,0 млрд рублей (впоследствии эта сумма была увеличена), большая часть которых — средства Всемирного банка (ВБ). Таким образом, был дан старт работам по модернизации метеорологической сети Росгидромета.

20 августа 2008 г. между Фондом БЭА, действующим от имени Министерства финансов Российской Федерации и Росгидромета, и закрытым акционерным обществом Лаборатория новых информационных технологий «ЛАНИТ», выигравшим конкурс,

было заключено контрактное соглашение РНМ/1/В.1.а на поставку оборудования для *всей* наземной метеорологической сети.

Этим же контрактом были определены задачи и функции *поставщика* (ЗАО «ЛАНИТ») и *получателя* (УГМС, ЦГМС-Р, ЦГМС), а также участие Росгидромета в реализации Проекта с привлечением НИУ Росгидромета, и в частности ГГО, к работам по методическому сопровождению Проекта модернизации, которое осуществлялось в рамках плана НИОКР Росгидромета.

Привлечение средств ВБ имело следующие несомненные достоинства:

- возможность получения значительных денежных средств в относительно короткие сроки;

- соответствие организации работ по модернизации сети и ее хода международным правилам, что обеспечивало в будущем сопоставимость результатов измерений с международными системами наблюдений;

- сохранение контрольных функций по расходованию средств за ВБ, что уменьшало риск нецелевого расходования средств;

- использование заемных средств ВБ, автоматически поднимающее статус Проекта, в связи с чем его реализация стала контролироваться Счетной палатой;

- внедрение на метеорологической сети новых технических средств, соответствующих лучшим образцам мирового метеорологического приборостроения.

К недостаткам принятого варианта финансирования и реализации Проекта модернизации можно отнести неготовность (техническую, кадровую, профессиональную, финансовую) системы Росгидромета к реализации столь масштабного Проекта в короткие и строго фиксированные сроки, а также недостаточную изученность адаптации СИ зарубежного производства к экстремальным климатическим условиям России. Кроме того, Проектом не предусматривались эксплуатационные расходы на подготовку мест установки и непосредственно на установку нового оборудования.

Принимая во внимание огромные, малообжитые пространства России, разнообразные и зачастую суровые климатические усло-

вия, неразвитую инфраструктуру на большей части территории, представлялось целесообразным реализацию Проекта модернизации начать с одного-двух полигонов с тем, чтобы отработать все вопросы технического, методического и метрологического обеспечения внедрения новых автоматизированных СИ и комплексов. Однако было принято иное решение.

Цели и задачи модернизации

Основной целью проекта модернизации наземной метеорологической сети Росгидромета является увеличение ее плотности, а также повышение качества результатов наблюдений, используемых Росгидрометом для выпуска прогностической продукции и обеспечения международных обязательств России в области обмена информацией о состоянии окружающей природной среды.

Проектом модернизации наземной метеорологической сети предусматривается не только поставка нового современного оборудования в наблюдательные подразделения УГМС, но и внедрение единой телекоммуникационной системы низовой связи и системы бесперебойного электроснабжения в ряде ОНС.

Для достижения указанной цели планировалось следующее:

— внедрить современные приборы и оборудование, сокращающие ручной труд персонала НП, и обеспечить вывод из эксплуатации СИ, выработавшие свой ресурс;

— уплотнить наблюдательную сеть путем установки автоматических метеорологических станций (АМС) в слабо изученных в метеорологическом отношении районах;

— разработать и внедрить новые технологии измерений, поверки СИ, сбора, обобщения и передачи информации от НП до сдачи ее в государственный фонд данных (ГФД).

В соответствии с контрактом РНМ/1/В.1.а поставщик (ЗАО «ЛАНИТ») должен обеспечить поставку оборудования и стандартного программного обеспечения (ПО), подготовку необходимой технической документации, учебных пособий и обучение персонала *получателя*, а также гарантийное обслуживание оборудования и программного обеспечения.

В контракте РНМ/1/В.1.а, наряду с перечнем работ *поставщика*, сформулированы и задачи *получателя*, главными из которых являются следующие:

- оценка необходимых ресурсов для УГМС, ЦГМС по подготовке пунктов наблюдений к размещению новых технических средств, доставке и монтажу нового оборудования;
- подготовка мест установки оборудования в НП, его монтаж, поверка и запуск в опытную эксплуатацию;
- организация и проведение параллельных синхронных наблюдений по табельным СИ и АМК, ААК с целью определения коэффициентов увязки сопряженных рядов.

Все изложенное нашло отражение в контракте РНМ/1/В.1.а, технических требованиях (ТТ) и других документах по модернизации сети и отвечает требованиям ВМО.

Научно-методическое сопровождение Проекта модернизации метеорологической сети было возложено на ГГО.

Научно-методическое, метрологическое и оперативно-организационное сопровождение Проекта модернизации

В соответствии с задачами Росгидромета, предусмотренными контрактом и заданиями Росгидромета, ГГО в рамках плана НИОКР осуществлено следующее:

- выполнена оценка необходимых ресурсов для УГМС по подготовке пунктов наблюдений к размещению новых технических средств, доставке и монтажу нового оборудования, которые включают в себя как разовые затраты на подготовку мест установки и монтаж АМК, АМС, ААК, так и ежегодные дополнительные затраты на обеспечение функционирования новых технических средств;
- разработан Комплект методических рекомендаций (КМР-2008), в котором сформулированы методические, организационно-технические и административно-хозяйственные рекомендации УГМС, регламентирующие функции территориальных орга-

нов Росгидромета, УГМС, ЦГМС, НП по подготовке пунктов наблюдений к установке АМК, по организации приемки АМК и их монтажу в НП, по проведению приемочных испытаний, по организации и проведению параллельных синхронных наблюдений);

— разработана и реализована новая технология метрологического обслуживания автоматизированных СИ на местах их эксплуатации и обеспечено метрологическое сопровождение внедрения в оперативную работу УГМС стационарных и мобильных автоматизированных поверочных лабораторий (СПЛ и МАПЛ);

— выполнена экспертиза ТТ к Проекту модернизации и технической и эксплуатационной документации, представленной ЗАО «ЛАНИТ»;

— разработаны и переданы ЗАО «ЛАНИТ» все алгоритмические материалы, необходимые для разработки ПО АМК и АМС;

— обеспечено оперативное методическое руководство, включая проведение кустовых обучающих семинаров метеорологов УГМС, ЦГМС, разработку и рассылку на сеть методических писем, контроль правильности установки АМК на метеорологических площадках в период поведения специалистами ГГО инспекций УГМС, ЦГМС;

— организован мониторинг состояния и работоспособности автоматизированной метеорологической сети.

Одним из этапов подготовки метеорологических НП к установке АМК являлось определение характерности местоположения пунктов наблюдений в соответствии с разработанными ГГО рекомендациями.

При определении характерности местоположения ПН учитываются следующие группы параметров:

а) однородность местности в радиусе 3—5 км (однотипность ее с местностью расположения метеоплощадки); принимается равной 0,2 при нехарактерности расположения станции (например, U-образный участок местности, явно выраженный склон холма, край крутого обрыва, опушка леса и пр.), 0,6 в случае затруднения в определении характерности и 1,0 при однородности ближайшего окружения с местностью в радиусе 3—5 км;

б) удаленность метеоплощадки от берегов морей и океанов, крупных озер, водохранилищ, рек; принимаются следующие значения параметра групп в зависимости от расстояния (L) до уреза воды:

L м	≤ 10	11— 20	21— 30	31— 40	41— 50	51— 60	61— 70	71— 80	81— 100	> 100
Параметр	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

в) наличие в охранной зоне (т. е. на расстоянии ≤ 200 м от ограды площадки) в разных направлениях (по восьми румбам) сплошных или отдельно стоящих препятствий (деревьев, кустарников, домов, заборов и пр.); параметр группы принимает следующие значения в зависимости от соотношения расстояния (L) до препятствия и его высоты (H):

L м	$\leq 2H$	$3H$	$4H$	$5-6H$	$7-9H$
Параметр	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
L м	$10-12H$	$13-15H$	$16-17H$	$18-19H$	$\geq 20H$
Параметр	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

г) наличие автодорог в охранной зоне метеоплощадки (без учета интенсивности движения) на различном расстоянии (L); принимаются следующие значения параметра группы для грунтовой дороги (ГД) и асфальтированной дороги (АД):

L м	≤ 20	21— 50	51— 75	76— 100	101— 125	126— 150	151— 200	≥ 200
Параметр ГД.....	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Параметр АД.....	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0

д) наличие за пределами охранной зоны метеоплощадки в разных направлениях (по восьми румбам) сплошных или отдельно стоящих высоких (высотой не менее 20 м) протяженных пре-

пятствий (холмы, горы, жилые массивы высотных зданий, лес, многоэтажные дома); принимаются следующие значения параметра групп в зависимости от соотношения расстояния до препятствия (L) и его высоты (H):

L м	$\leq 10 H$	$11-15 H$	$16-20 H$	$21-25 H$	$26-30 H$	$> 30 H$
Параметр	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Осредненный показатель состояния параметров б—д оценивается по восьми румбам. Если хотя бы по одному из румбов показатель i -го параметра (X_{ik}) оценен как 0,1, то осредненный показатель (P_i) по всем румбам не рассчитывается и принимается равным 0,1.

Средний (по всем румбам) показатель состояния i -го параметра (P_i) рассчитывается по формуле

$$P_i = \frac{\sum_{k=1}^8 X_{ik}}{8}, \quad (1)$$

где k — румб.

Критерий состояния характерности местоположения метеоплощадки j -й станции (R_j) рассчитывается по формуле

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (2)$$

где n — общее число учитываемых параметров, равное пяти.

Критерий состояния характерности местоположения метеорологической площадки рассчитывается по всем функционирующим метеорологическим наблюдательным подразделениям, а также по пунктам, в которых намечается установка АМС.

Организация и проведение параллельных синхронных наблюдений (Руководство, 2008) является не менее важным этапом модернизации, поскольку априори внедрение новых СИ и переход на иные временные интервалы измерений могут привести к наруше-

нию однородности имеющихся рядов наблюдений за многолетний период, хранящихся в Госфонде, стоимость которых оценивается примерно в 50 млрд рублей, и нельзя допустить, чтобы эти данные не использовались из-за нарушения однородности рядов.

В ГГО разработаны методика и программа проведения параллельных синхронных наблюдений в НП. На их основе разработано и разослано в УГМС программное обеспечение компьютерной обработки данных этих наблюдений.

Главной задачей параллельных синхронных наблюдений в НП является определение возможных различий в показаниях штатных СИ и АМК при измерении основных метеорологических величин (температура и влажность воздуха, скорость ветра, жидкие осадки, температура поверхности почвы, давление).

Параллельные синхронные наблюдения организуются во всех пунктах наблюдений государственной наблюдательной сети, в которых устанавливаются АМК, исключая отдаленные, труднодоступные и не полностью укомплектованные персоналом и штатными СИ метеорологические наблюдательные подразделения. В случае наличия в конкретной физико-географической провинции нескольких НП, расстояние между которыми не превышает 80—100 км, к параллельным синхронным наблюдениям привлекаются не все станции данной провинции.

П р и м е ч а н и е . Если в какой-либо достаточно большой физико-географической провинции специалисты УГМС, ЦГМС исходя из опыта работы выделяют несколько различающихся по погодным условиям районов, за основу следует брать не провинцию, а выделенные районы.

В среднем по Росгидромету к параллельным синхронным наблюдениям может быть привлечено примерно 60—70 % НП. Решение о числе НП конкретного УГМС, в которых необходимо проводить параллельные синхронные наблюдения, принимают специалисты ГМЦ (ЦГМС), помня при этом, что должна быть обеспечена возможность достоверного распространения полученных по выборочной сети НП коэффициентов увязки на все НП УГМС. Более подробные рекомендации по организации и проведению параллельных синхронных наблюдений изложены в Методическом письме ГГО № 16-2010.

В период проведения параллельных синхронных наблюдений дежурный техник-метеоролог выполняет свои обычные обязанности в соответствии с требованиями Наставления (Наставление, 1985).

Учитывая, что метеорологические величины (характеристики), измеряемые АМК в единые сроки, выбираются за строго фиксированные 10-минутные интервалы (с 50 по 00 мин), чрезвычайно важно обеспечить строгое соблюдение сроков и времени производства наблюдений по табельным СИ.

Продолжительность параллельных синхронных наблюдений в соответствии с рекомендациями ВМО может колебаться от 1 до 3 лет. Их продолжительность в том или ином конкретном НП зависит от временной и пространственной изменчивости основных метеорологических величин, а также от полноты и достоверности этих наблюдений.

Кроме того, при обобщении и анализе материалов следует принимать во внимание наличие несовпадений динамических характеристик табельных и внедряемых СИ (например, термометр — психрометрическая будка, датчик температуры и влажности — радиационная защита АМК и т. д.).

Обобщенные и проанализированные по месяцам с учетом местных физико-географических и погодных условий материалы параллельных синхронных наблюдений направляются УГМС в ГГО для определения территориальных коэффициентов связи имеющихся рядов основных метеорологических величин с обобщенными по месяцам данными АМК, ААК.

Мониторинг состояния модернизации сети и предварительные результаты

Близится срок завершения масштабного проекта модернизации метеорологической сети Росгидромета, и, как водится в России, на финише заметно активизировалась работа в ряде УГМС по вводу в эксплуатацию новых технических средств. По этой причине любые приводимые статистические данные о внедрении автоматизированных систем на следующий день уже отличаются

от приведенных ранее. Тем не менее некоторые статистические данные о состоянии выполнения Проекта модернизации достаточно любопытны.

К началу октября 2011 г. все предусмотренные Контрактом № РНМ/1/В.1.а АМК, АМС, ААК (1627, 310 и 19 соответственно) поставлены в УГМС, ЦГМС, т. е. *поставщик* формально выполнил свою основную задачу. Однако оценка выполнения следующих этапов Проекта менее оптимистична: из-за дефицита (отсутствия) в ряде УГМС финансовых средств на доставку (аренду вертолетов) оборудования в НП не все поставленные в управления АМК, АМС, ААК доставлены в места установки (прежде всего, в Арктическом регионе и малообжитых районах северных и азиатских УГМС).

По этой причине около 20 % поставленных АМК, почти 70 % АМС и около 30 % ААК в места назначения не доставлены. Из общего числа установленных в НП АМК, АМС лишь около 30 % введены в эксплуатацию, т. е. подают более или менее регулярно сообщения SYNOP в центры сбора данных (УГМС, ЦГМС).

При этом даже от этих АМК, АМС информация в Гидрометцентр России не передается из-за неустойчивой связи АМК, АМС с центрами сбора информации. Переход на подачу сообщений SYNOP через АМК может привести, по крайней мере на первом этапе, к значительной потере информации, а число АМК, с которыми установлен устойчивый удаленный доступ, составляет чуть более половины (53 %) числа действующих. Кроме того, остается нерешенным вопрос об оценке плана сбора информации УГМС через АМК при высокой вероятности пропусков в ее поступлении.

Почти в 500 НП (около 40 % установленных АМК) зоны сельскохозяйственного производства установлены датчики на глубине узла купания. Однако в программное обеспечение (ПО) АМК этот датчик не включен.

Вызывает вопросы и работа ПО АМК, разработанного *поставщиком*. Несмотря на одобрение Методической комиссией ГГО алгоритмов ПО и постоянную корректировку его по замечаниям УГМС, работа ПО АМК по-прежнему не в полной мере отвечает требованиям.

Одной из причин такого положения является регламентируемая кодом КН-01 несогласованность сроков наблюдений и передачи информации об экстремальных температурах воздуха и осадках за день, ночь в отдельных УГМС, расположенных в различных часовых поясах. Если в ручном режиме это было допустимо, то в случае автоматизированной сети возникли проблемы.

Нельзя не упомянуть и о времяисчислении, в соответствии с которым определяются сроки метеорологических наблюдений. В свое время, чтобы не вводить время для каждого градуса (один градус — одна минута), всю территорию планеты поделили на 24 равных сегмента — часовых пояса.

В 1884 г. Международная меридиональная конференция в Вашингтоне установила гринвичское время точкой отсчета и присвоила гринвичскому меридиану нулевую долготу. От него и начали вести отсчет часовых поясов.

Теоретически границы всех часовых поясов должны быть прямыми ($7,5^\circ$ по обе стороны от среднего меридиана каждого пояса). Однако государственные границы существенно отличны от прямых, как и положение горных хребтов, русел рек и т. п. Поэтому странам было разрешено выбирать часовой пояс по своему усмотрению. На территории России было выделено 11 часовых поясов.

В России метеорологические сутки с 1881 г. начинались в 19 ч, поскольку наблюдения велись по среднему солнечному времени и следующий срок приходился уже на 1 ч следующих календарных суток. При переходе наблюдений в 1966 г. на единые синхронные сроки метеорологические сутки стали отсчитываться в каждом часовом поясе от срока, ближайшего к 20 ч местного декретного времени, введенного непонятно зачем в 1931 г. (19 ч среднего солнечного).

Весной 2011 г. летнее сезонное время стало постоянным, что еще больше отодвинуло установленный ритм жизнедеятельности населения от биологического, хотя в большинстве стран установленный и биологический ритмы совпадают или близки. Мы же решительно двигаемся в противоположную сторону.

В завершение «игр со временем» Постановлением Правительства РФ от 31.08.2011 на территории страны введены часовые зо-

ны. Время в каждой следующей часовой зоне отличается от времени в предыдущей зоне на 1 ч. Правда, между второй и третьей часовыми зонами разница составляет 2 ч. Арифметика, однако...

Чукотке и Камчатке предписано жить по магаданскому времени — в результате на Чукотке установленное время соответствует поясному, а на Колыме опережает его на 2 ч. Установление начала метеорологических суток в различных часовых зонах в связи с этим представляет определенные сложности, особенно для автоматизированной сети.

В связи с введением новой системы времяисчисления, объединением часовых поясов, а также внедрением на сети АМК, позволяющим получать информацию ежечасно, в ряде регионов (Поволжье, Западная Сибирь, Якутия, Чукотка) требуется уточнение времени начала метеорологических суток с целью приближения их к астрономическим. Без таких уточнений, на которые требуется время, доработка ПО АМК затруднительна.

Процедуру трехсуточного прогона в соответствии с ТТ к Проекту прошли весьма немногие АМК. Основные причины невыполнения этого требования ТТ — продолжительное отсутствие в НП окончательной версии ПО АМК, АМС, отсутствие удаленного доступа к ней и необходимых финансовых средств на повторные посещения установленных АМК во многих УГМС. Тем не менее без документального оформления трехсуточного прогона приемка АМК, АМС, ААК в постоянную эксплуатацию в соответствии с ТТ не допускается. Об организации и проведении трехсуточного прогона достаточно подробно говорится в Методических письмах ГГО № 13-2009 и № 16-2010.

Работоспособность АМК в большинстве пунктов наблюдений не отвечает требованиям, имеют место перебои в работе АМК по следующим причинам:

- неустойчивая связь между НП и ЦСД,
- ошибки в ПО АМС и АМК,
- перебои в энергоснабжении,
- временное нарушение работоспособности датчика влажности (при длительном периоде с влажностью около 100 %) и датчика параметров ветра при опасных гололедно-изморозевых отложениях,

— нарушение работоспособности логгера после временного отключения электропитания,

— подверженность логгера воздействию атмосферных электрических разрядов.

Нерешенным остается и ряд других проблем в обеспечении нормального функционирования АМК, основными из которых являются следующие:

— энергоснабжение, что вызывает необходимость определить неблагоприятные с точки зрения энергообеспечения НП и принять меры по их дополнительному оснащению автономными источниками электроснабжения генераторного типа;

— обеспечение УГМС, ЦГМС ЗИПами и обменным фондом датчиков для замены вышедших из строя на отдаленных и труднодоступных станциях;

— пополнение парка МАПЛ за счет закупки и внедрения МАПЛ во всех УГМС и крупных (число АМК 15 и более) ЦГМС;

— обеспечение сохранности дорогостоящего оборудования, для чего необходимо обобщить опыт УГМС, ЦГМС и наиболее перспективные формы охраны метеоплощадок (установка видеокамер, тепловизоров, охранной сигнализации, сдача на пульт охраны полиции и пр.) внедрить на проблемных станциях, предусмотрев соответствующее финансирование;

— обеспечение регулярного измерения сопротивления заземления АМК, АМС, для чего необходимо предусмотреть получение лицензий на право выполнения этой работы и оснастить ССИ УГМС необходимой аппаратурой.

Развитие процесса модернизации — проект «Модернизация-2»

Чем ближе время окончания Проекта модернизации, тем очевиднее становится, что проделанная в рамках Проекта большая работа по глубокой модернизации далека от завершения. Многие вопросы возникли в процессе работы над Проектом, и ответы на них еще предстоит найти.

Внедрение на всей метеорологической сети АМК с типовым (но ограниченным) набором датчиков удовлетворяет прогнози-

стов, но не решает многие важные вопросы функционирования наземной метеорологической сети: можно ли уменьшить штат на автоматизированной сети; изменится ли разряд НП, оснащенных АМК; как изменится режим работы персонала при вводе в постоянную эксплуатацию АМК; изменятся ли принципы контроля достоверности измеряемых в непрерывном режиме величин и пр.

Осознание незавершенности работ в рамках Проекта модернизации руководством и специалистами Росгидромета позволило сформулировать единое представление о целесообразности продолжения работ по модернизации наземной наблюдательной, в том числе метеорологической, сети Росгидромета, поддержанное Правительством РФ. Так возник проект «Модернизация-2».

В рамках проекта «Модернизация-2» представляется целесообразным сосредоточиться на решении следующих вопросов:

- расширить номенклатуру датчиков АМК за счет закупки датчиков высоты снежного покрова, дальности видимости, осадков (весового осадкомера), продолжительности солнечного сияния и температуры почвы на глубине кущения. Последний целесообразно в будущем включить в комплект термометров для измерения температуры почвы на оголенном участке в режиме круглогодичных измерений;

- сформировать систему закупки, технического обслуживания и ремонта оборудования автоматизированной метеорологической сети для обеспечения ее бесперебойного функционирования;

- разработать новые и переработать действующие нормативные документы, регламентирующие работу модернизированной сети;

- закупить эталонные средства верхнего уровня (для ГГО) с целью обеспечения поверки эталонных средств УГМС;

- переработать и внедрить в оперативную работу руководящие документы, регламентирующие функционирование автоматизированной метеорологической и актинометрической сети;

- пересмотреть структуру метеорологической сети за счет изменения разрядов наблюдательных подразделений и организации многоцелевых НП обсерваторского типа;

- обосновать целесообразность перехода метеорологической сети на учащенные (ежечасные) сроки наблюдений;

— разработать новую технологию сбора, обработки и хранения информации с учетом возможности получения учащенных данных и перехода сети на передачу из НП единого потока информации на базе использования таблично-ориентированных кодовых форм (ТОКФ);

— перейти на безбумажную технологию ведения технических журналов в НП;

— разработать систему менеджмента качества метеорологической информации в звене НП—Центр сбора данных как часть системы менеджмента качества в Росгидромете в соответствии с ISO 9000.

Кроме того, исходя из собственного опыта автоматизации наблюдений в 70-х годах прошлого века (Методические основы..., 1971; С. М. Персин, 1975) и современного опыта других стран, в частности метеорологической службы Канады, представляется целесообразным:

— укрепить технические службы УГМС путем организации при УГМС и крупных ЦГМС групп мониторинга и оперативного технического обслуживания автоматизированной сети, обеспечения их функционирования;

— с целью координации работ в УГМС по обеспечению бесперебойной работы АМК, АМС, ААК, включая вопросы связи, организовать в составе ГГО «Центр оперативного руководства автоматизированной сетью» (ЦОРАМС) и обеспечить его функционирование;

— для бесперебойного обеспечения поступления на сеть резервных (обменных) фондов технических средств, средств поверки и пр. создать в системе Росгидромета Центр обеспечения резервных (обменных) фондов компонентов АМК и АМС в УГМС и ЦГМС и обеспечить его функционирование;

— предусмотреть замену установленных датчиков жидких осадков ввиду их сезонности и невозможности измерения количества слабых осадков.

Заключение

Подводя предварительные итоги модернизации сети, следует признать: Проект состоялся. Состоялся он, несмотря на имевшие место просчеты, недоработки, нестыковки, неполную готовность

системы Росгидромета к столь крутым переменам и чрезмерный оптимизм его участников. Не все удалось сделать в намеченные сроки.

В короткий срок выполнена беспрецедентная по масштабам и сложности работа по обеспечению наземной метеорологической сети современными средствами автоматизированного получения, сбора и передачи метеорологической информации в регионах с преобладанием сложных климатических условий и во многом неразвитой телекоммуникационной и транспортной структурой на чрезвычайно обширной территории.

Несмотря на указанные особенности и трудности, специалистами УГМС, ЦГМС, НП была проявлена готовность к реализации необходимых мероприятий, граничащая с энтузиазмом. Во многих УГМС осуществление Проекта рассматривается как единственная возможность для проникновения современных технологий в область их деятельности. К этому можно добавить, что освоение таких технологий проходило без каких-либо серьезных осложнений и в довольно сжатые сроки, что еще раз убеждает в наличии большого потенциала в системе Росгидромета.

Бережное и целевое использование этого потенциала позволило бы достичь большего результата. Так, например, в отношении УГМС, находящихся в депрессивных регионах на огромных территориях с особыми физико-географическими и климатическими условиями (Забайкальское, Дальневосточное, Колымское, Чукотское), следовало бы дать обоснованное консолидированное заключение о необходимости дифференцированного подхода к созданию автоматизированных сетей метеонаблюдений и их эксплуатации. Такое заключение стало бы основой для соответствующей корректировки финансирования при осуществлении и завершении работ в этих УГМС и позволило бы уравнивать возможности на успех УГМС азиатской части России с УГМС европейской части.

Впереди предстоит не менее сложная и затратная работа, поскольку развивающийся процесс использования современных информационных технологий и автоматизации в системе метеонаблюдений Росгидромета необратим.

Автор считает необходимым отметить участие в работах по научно-методическому сопровождению Проекта сотрудников ГГО: с.н.с. С. Ю. Гаврилову, гл. спец. А. С. Зайцева, зав. лаб. Б. М. Ильина, зав. лаб. Л. В. Луцько, зав. отделом метрологии В. Ю. Окоренкова, зав. лаб. С. М. Персина, с.н.с. Г. П. Резникова, с.н.с. Л. М. Рябову, в.н.с. Т. П. Светлову и ряда других. Особое внимание уделялось этому проекту со стороны руководства ГГО: директора В. М. Катцова и зам. директора по научной работе С. С. Чичерина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Методические основы автоматизированной системы метеорологических наблюдений (1971) / Под ред. Д. П. Беспалова. — Л.: Гидрометеиздат, с. 3—35.

Персин С. М. (1975). Основы теории и проектирования автоматических измерительных систем. — Л.: Гидрометеиздат. 320 с.

Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. 7-е изд. (2008). ВМО № 8. — Женева.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам (1985). Вып. 3. Ч. 1. — Л.: Гидрометеиздат.

УДК 551 006.92 (47+57)

**О ПРИМЕНЕНИИ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ ИСО
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
НА ГОСУДАРСТВЕННОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

Т. П. Светлова

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

Поступила в редакцию 21.07.2011
Поступила после доработки 1.09.2011

Международная организация по стандартизации (ИСО) резолюцией 43/2007 Совета ИСО признала Всемирную метеорологическую организацию (ВМО) в качестве международного органа по стандартизации и заключила с ней Рабочее соглашение.

Рабочее соглашение, заключенное ВМО с ИСО и утвержденное Исполнительным советом ВМО на 60-й сессии в июне 2008 г. и генеральным секретарем ИСО, направлено на ускорение разработки международных стандартов, имеющих отношение к метеорологическим, климатологическим, гидрологическим и морским гидрометеорологическим данным, продукции и обслуживанию, связанным с окружающей средой. Стандарты, разработанные в результате применения этого рабочего соглашения, далее именуется «общими стандартами».

В целях эффективного выполнения задач, вытекающих из соответствующих уставных документов, генеральный секретарь ВМО и генеральный секретарь ИСО договорились действовать в дальнейшем в тесном сотрудничестве. Такое сотрудничество включает и поощряет активное участие ВМО в качестве связующей организации в работе соответствующих технических комитетов (ТК) и/или подкомитетов (ПК) ИСО.

Рабочее соглашение применяется к следующим видам работ:
публикации, предлагаемые ВМО, которые, по заключению ИСО, не подпадают в сферу компетенции ни одного из существующих комитетов ИСО;

публикации, предлагаемые ВМО, которые подпадают в сферу компетенции ИСО, а именно: ИСО/ТК 146 (Качество воздуха), ИСО/ТК 147 (Качество воды), ИСО/ТК 113 (Гидрометрия), ИСО/ТК 180/ПК 1 (Солнечная энергия, климат — измерения и данные) или ИСО/ТК 211 (Географическая информация/геоматика);

предлагаемая ВМО или ИСО работа, подпадающая в сферу компетенции упомянутых технических комитетов ИСО, в отношении которой ИСО и ВМО согласились, что значительный вклад в разработку требуемого общего стандарта будет внесен как ИСО, так и ВМО.

Текст любого общего стандарта утверждается обеими Организациями независимым образом. Если условия для утверждения, регламентированные п. 4 Соглашения, соблюдены, то проект стандарта переходит в стадию утверждения. Если в ходе своих консультаций ВМО или ИСО не утверждает новый предложенный вид работы или какой-либо выдвигаемый проект, то другая Организация сохраняет за собой право продолжить работу отдельно в соответствии со своими обычными процедурами.

Общие стандарты публикуются после утверждения их как ВМО, так и ИСО в качестве итоговой продукции ИСО. При отсутствии иной договоренности ИСО и ВМО опубликуют два отдельных документа идентичного содержания.

В случае если ИСО и ВМО не придут к единому заключению в отношении необходимости пересмотра общего стандарта, каждая Организация может принять решение о пересмотре этого общего стандарта в одностороннем порядке. В последнем случае итоговый стандарт не может рассматриваться как общий.

Соглашение ИСО и ВМО подлежит пересмотру каждые четыре года с внесением в него поправок по мере необходимости и в целях расширения отношений сотрудничества между двумя Организациями.

Следует, однако, иметь в виду, что вхождение Росгидромета в систему действующих в РФ Технических комитетов (ТК) по стандартизации и тем более международных ТК без соблюдения своих, т. е. соответствующих правил и процедур ВМО, как это регламентировано в п. 3 Рабочего соглашения между ИСО и ВМО, может дискредитировать саму идею объединения работы этих двух организаций (и соответственно Росстандарта и Росгидромета) в «единое гармоничное усилие, направленное на укрепление разработки международных стандартов и во избежание дублирования работы над стандартами» (см. п. 1 Рабочего соглашения).

Представляется, что соглашение между ВМО и ИСО является определенным шагом в налаживании эффективного взаимодействия между всеми участниками системы измерений в РФ, регулируемой Федеральным законом ФЗ № 102 «Об обеспечении единства измерений», направленного в том числе на защиту граждан и юридических лиц от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

К сожалению, первый шаг, предпринятый в этом направлении Госстандартом, остался не замеченным базовыми метрологическими организациями Росгидромета, несмотря на то что в апреле 2002 г. в целях прямого применения международных стандартов ИСО 5725-1:1994, ИСО 5725-2:1994, ИСО 5725-3:1994, ИСО 5725-4:1994, ИСО 5725-5:1998, ИСО 5725-6:1994 под общим заголовком «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений» (Стандарт ИСО 5725) Госстандарт России принял шесть государственных стандартов Российской Федерации с соответствующими номерами от 1-го до 6-го (ГОСТ, 2002) под тем же заголовком, содержащих полный аутентичный текст упомянутых шести международных стандартов ИСО 5725. Все перечисленные стандарты впервые регламентируют в том числе и точность измерений в окружающей среде.

Показателем «правильности» измерений (*trueness*) в указанных стандартах является систематическая погрешность, а термин «прецизионность» (*precision*), определенный как «степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях», зави-

сит только от случайной погрешности и не имеет отношения к истинному или установленному значению измеряемой величины.

Меру «прецизионности» выражают как стандартное (средне-квадратическое) отклонение результатов измерений. Количественные значения мер «прецизионности» зависят от регламентированных условий выполнения измерений. Крайними случаями таких условий в ГОСТе (2002) определены условия повторяемости и условия воспроизводимости. В рассматриваемом случае именно такие условия установлены требованиями ВМО и Росгидромета и регламентированы в Руководствах и Наставлениях по различным видам наблюдений, осуществляемых на глобальной и государственной наблюдательных сетях.

Прямое применение международных стандартов ИСО 5725 в Российской Федерации на современном этапе весьма актуально и своевременно, о чем свидетельствует публикация Асташенкова и др. (2002), в которой подробно анализируется затронутая проблема и показаны ее возможности для обеспечения необходимого качества результатов измерений в Российской Федерации. В упомянутой публикации, кроме того, прослеживается связь традиционно используемых в российских стандартах понятий с применяемыми в международных стандартах ИСО, что облегчает понимание необходимости прямого применения стандарта (ГОСТ, 2002) и для определения качества измерений объектов окружающей среды.

Стандарты (ГОСТ, 2002), как показано в публикации Асташенкова и др. (2002), направлены на прямое применение международных правил планирования и проведения межлабораторных экспериментов по оценке показателей точности (правильности и прецизионности) результатов измерений (испытаний, анализа), в том числе при следующих применениях:

- разработка, аттестация и стандартизация методик выполнения измерений (МВИ);

- оценка качества стандартизуемых и применяемых МВИ;

- контроль качества (точности) результатов измерений (испытаний);

проверка приемлемости результатов измерений (испытаний) для разрешения спорных ситуаций между поставщиками и получателями продукции (в рассматриваемом случае между поставщиками средств измерений (СИ) и организациями Росгидромета, использующими СИ для производства измерений на государственной наблюдательной сети).

Шесть стандартов (ГОСТ, 2002) построены таким образом, что основополагающим является ГОСТ Р ИСО 5725-1, в котором установлены основные положения и определения, касающиеся всех остальных пяти стандартов.

В этих стандартах регламентируются методы определения отдельных показателей «правильности» (систематической погрешности и ее составляющих) и «прецизионности» (случайной погрешности и ее составляющих) стандартного метода измерений и практические применения значений точности. При этом под «стандартным методом измерений» понимается «письменный документ, устанавливающий во всех подробностях, как должно выполняться измерение, и предпочтительно включающий в себя описание процедур получения и подготовки образцов для выполнения измерений» (п. 4.1.1 ГОСТ Р ИСО 5725-1). Применительно к наблюдениям в условиях окружающей среды такими документами являются Наставления и Руководства по различным видам наблюдений и подготовке пунктов наблюдений в соответствии с регламентируемыми ими требованиями.

Понятие «метод измерений» по ИСО 5725 включает совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов с известной точностью, т. е. оно полностью адекватно понятию «методика выполнения измерений» по ГОСТу (ГОСТ, 1996) и значительно шире по смыслу, чем термин «метод измерений» в п. 7.2 (РМГ 29-99).

Понятие «точность» определяется в этих стандартах как степень близости результатов измерений к принятому «опорному» значению (п. 3.6 ГОСТ Р ИСО 5725-1). Соответственно систематическая погрешность (δ) — это разность между математическим ожиданием результатов измерений (m) и истинным (или, в его отсутствие, принятым «опорным») значением (μ):

$$\delta = m - \mu. \quad (1)$$

Под принятым «опорным» значением в указанном документе понимают значение, которое служит в качестве согласованного для сравнения, либо:

а) теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах;

б) математическое ожидание (общее среднее значение) заданной совокупности результатов измерений в условиях отсутствия необходимых эталонов, обеспечивающих воспроизведение, хранение и передачу соответствующих значений единиц измеряемых величин — истинных или условно истинных (действительных), выраженных в узаконенных единицах.

Условно истинное (действительное) значение физической величины понимается как эталонное, т. е. так же, как в РМГ 29-99, а точность определяется как степень близости результата измерений к истинному (эталонному) или условно истинному (действительному) значению измеряемой физической величины.

В условиях отсутствия эталонов объектов окружающей среды, т. е. физических систем, наблюдаемых процессов, явлений и т. д., которые характеризуются одной или несколькими измеряемыми физическими величинами, в отечественной и международной практике за действительное значение зачастую принимают общее среднее значение (математическое ожидание) установленной (заданной) совокупности результатов измерений.

При оценке качества результатов метеорологических измерений на государственной наблюдательной сети используется среднее значение (математическое ожидание) невязки интерполяции, вычисляемое при пространственном контроле по группе станций, окружающих контролируемую станцию, — так называемых «вливающих» станций (Рекомендации, 1993).

Таким образом, математическое ожидание в рассматриваемом случае устанавливается сличением значения контролируемой метеорологической величины (или ее характеристики) с результатом, полученным другим методом, а именно известным методом группового эталона, в качестве которого выступают четыре—

шесть окружающих («влияющих») станций. Показателем «правильности» результатов наблюдений при этом является систематическая погрешность, т. е. значение невязки интерполяции, рассчитанной в процессе пространственного контроля. При этом, если невязка не превышает допустимого (опорного) значения, результаты наблюдений считаются правильными (Светлова, 1974).

В отсутствие необходимого числа «влияющих» станций принятым для сравнения результатов измерений «опорным» значением может быть значение так называемого «допуска», используемого для браковки недостоверных результатов при контроле ручным методом.

Следует отметить, что наряду с традиционными понятиями систематической погрешности результата измерений, о котором говорилось выше, и систематической погрешности метода измерений в международных стандартах (ИСО 5725) впервые стандартизованы понятия «систематическая погрешность лаборатории при реализации конкретной МВИ» и «лабораторная составляющая систематической погрешности метода измерений» (п. 3.8—3.11 ГОСТ Р ИСО 5725-1) как две составляющие результата измерений в конкретной аккредитованной лаборатории.

В соответствии с ГОСТом (ГОСТ, 2002) систематическая погрешность лаборатории при реализации конкретного метода измерений (конкретной МВИ) (*laboratory bias*) — это разность между математическим ожиданием результатов измерений (или результатов испытаний) в отдельной лаборатории и истинным (или, в его отсутствие, принятым опорным) значением измеряемой характеристики.

Систематическая погрешность лаборатории при реализации конкретного метода измерений и стабильность этого значения в течение определенного периода времени в международной практике относится к основным показателям состояния измерений испытательных лабораторий высокого рейтинга, которыми руководствуются при оценке, а также при формировании сети таких лабораторий.

Систематическую погрешность метода измерений (*bias of the measurement method*) при испытании вновь внедряемого СИ оце-

нивают по разности между математическим ожиданием (общим средним значением) результатов измерений, полученных в большом числе лабораторий, применяющих данный метод, и истинным значением (или, в его отсутствие, принятым «опорным» значением) измеряемой характеристики. Систематическая погрешность метода измерений может зависеть от значения измеряемой характеристики, т. е. может быть различной на разных уровнях.

В ГОСТ Р ИСО 5725-1 предложена исходная (базовая) статистическая модель, в которой каждый результат измерений (y) для конкретного исследуемого объекта представлен как сумма трех составляющих:

$$y = m + B + e, \quad (2)$$

где m — общее среднее значение (математическое ожидание) результатов измерений, B — лабораторная составляющая систематической погрешности метода в условиях повторяемости, e — случайная составляющая погрешности каждого результата измерений в условиях повторяемости.

При определении систематической погрешности стандартного метода измерений в базовой модели (2) общее среднее значение (m) может быть представлено в виде

$$m = \mu + \delta. \quad (3)$$

В этом случае модель (2) принимает вид

$$y = \mu + \delta + B + e. \quad (4)$$

Эту модель применяют, когда необходимо определить систематическую погрешность метода измерений (δ). Поскольку B — лабораторная составляющая систематической погрешности стандартного метода измерений, то она является составляющей результата измерений, представляющей межлабораторную вариацию.

Систематическую погрешность лаборатории (Δ) при реализации конкретного стандартного метода измерений представляют следующим образом:

$$\Delta = \delta + B, \quad (5)$$

и тогда модель (4) может быть представлена в виде

$$y = \mu + \Delta + e. \quad (6)$$

Эту модель используют при определении систематической погрешности лаборатории (Δ), причем здесь присутствует как величина случайной составляющей погрешности (e) в условиях повторяемости, так и величина лабораторной составляющей систематической погрешности стандартного метода измерений, которая для измерений в данной лаборатории в условиях повторяемости есть величина постоянная. Однако эта величина может изменяться как при изменении условий выполнения измерений в данной лаборатории, так и в зависимости от значения измеряемой величины (уровня). При рассмотрении величины B в масштабах применения стандартного метода в разных лабораториях, как уже отмечалось, она является случайной величиной, представляющей межлабораторную вариацию.

По этой причине систематическая погрешность лаборатории (Δ) при реализации конкретного метода измерений определяет правильность результатов измерений в данной лаборатории, а величина $\mu + B + e$ определяет прецизионность конкретного метода и результатов измерений, выполняемых этим методом в условиях повторяемости и в условиях воспроизводимости.

Как утверждается в работе Асташенкова и др. (2002), соответствующие процедуры оценки качества выполнения измерений подробно изложены в разделах 6 и 7 ГОСТ Р ИСО 5725-6 и широко используются при оценке деятельности испытательных лабораторий с целью признания или подтверждения их компетентности.

Остановимся подробнее на рассмотренных выше показателях точности методов и результатов применительно к метеорологическим измерениям в системе Росгидромета, которые осуществляются в натуральных условиях окружающей среды, когда в роли «лабораторий» выступают конкретные пункты наблюдений, а лабораторная составляющая погрешности (B) возникает в результате нарушений требований к содержанию метеорологической пло-

щадки и охранной зоны в каждом конкретном метеорологическом подразделении государственной наблюдательной сети.

В этих условиях показатели состояния измерений фактически и являются количественными показателями качества выполнения измерений на станции, без установления которых невозможно обеспечить реализацию необходимых корректирующих действий при отработке окончательного алгоритма выполнения измерений аттестованным методом с требуемой (заданной) или гарантируемой (установленной) точностью. Более того, контроль и стабильность именно показателей состояния метеорологических площадок и их охранных зон являются залогом обеспечения надлежащего качества выполнения измерений на государственной наблюдательной сети, что до сих пор не всегда учитывается в документах ВМО и Росгидромета.

Применительно к оценке качества результатов метеорологических измерений показатели оценки состояния измерений в пункте наблюдений государственной наблюдательной сети обязательно должны учитывать и составляющую систематической погрешности метода измерений в условиях повторяемости (B), вносимую состоянием самого пункта наблюдений, прежде всего его охранной зоны, которая в ряде случаев делает конкретные пункты наблюдений (станции) «некомпетентными» (ГОСТ, 2000), т. е. не соответствующими установленным требованиям (прежде всего, к репрезентативности) и/или знаниям, опыту выполнения измерений в рассматриваемой области измерений.

Таким образом, в соответствии с требованиями ГОСТа (ГОСТ, 2002) при контроле качества (точности) выполнения измерений (испытаний) стандартным методом в каждом пункте метеорологических наблюдений необходимо проверять и оценивать не только стабильность результатов измерений, но и стабильность во времени значения систематической погрешности метода в условиях повторяемости в пределах конкретного пункта наблюдений (станции). Это означает необходимость контроля соответствия установленным требованиям состояния метеорологической площадки и ее охранной зоны при реализации аттестованного стандартного метода измерений в течение длительного периода времени.

В противном случае мы получаем неоднородные климатические ряды наблюдений из-за нарушения требований ВМО и Росгидромета к состоянию метеорологической площадки и ее охранной зоны, а также к сохранности пункта наблюдений (станции) в неизменных условиях ближайшего окружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асташенков А. И., Заец Е. А., Исаев Л. К. (2002). Внедрение стандартов ГОСТ Р ИСО 5725-6. Повышение качества измерений и испытаний // Законодательная и прикладная метрология. № 6.

ГОСТ Р 8.563-96 ГСОЕИ. Методика исполнения измерений.

ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.

ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений.

ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений.

ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений.

ГОСТ Р ИСО 5725-5-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений.

ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике.

ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

Рекомендации по анализу результатов пространственного контроля режимной метеорологической информации (1993). — СПб: Гидрометиздат. 176 с.

РМГ 29—99 ГСОЕИ. Метрология. Основные термины и определения.

Светлова Т. П. (1974). Критерии достоверности при контроле на ЭВМ режимной метеорологической информации // Труды ГГО. Вып. 340. С. 30—35.

Стандарт ИСО 5725, ИСО 5725-1:1994, ИСО 5725-2:1994, ИСО 5725-3:1994, ИСО 5725-4:1994, ИСО 5725-5:1998, ИСО 5725-6:1994.

УДК 551.501

О МОДЕРНИЗАЦИИ АКТИНОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ¹

Л. В. Луцько, Е. Л. Махоткина

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

Поступила в редакцию 15.09.2011

Регулярные актинометрические наблюдения в России впервые были начаты в 1912 г. в Павловской магнитно-метеорологической обсерватории Главной физической обсерватории (ныне Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, ГГО), где была организована непрерывная регистрация основных составляющих радиационного баланса: прямой солнечной, суммарной, рассеянной и эффективной радиации. Позднее (в 1924 г.) в ГГО под руководством Н. Н. Калитина было образовано специальное актинометрическое отделение — Центральный институт актинометрии и атмосферной оптики, который возглавил все экспериментальные и научно-исследовательские работы в области актинометрии, выполняемые в Гидрометеослужбе СССР, а также координировал радиационные исследования, проводившиеся в других ведомствах. В задачи Института входили организация актинометрической сети, обеспечение ее функционирования (включая создание технических средств), получение достоверной информации, ее анализ и обобщение, а также просветительская работа прикладного характера в организациях, в работе которых использование актинометрической информации

¹ Доклад на 53-м заседании совместной коллегии Комитета Союзного государства по гидрометеорологии и мониторингу загрязнения природной среды, г. Новополоцк, 13—14 сентября 2011 г. и на оперативно-производственном совещании «Модернизация метеорологической сети: результаты, проблемы, пути решения», Санкт-Петербург, 11—12 октября 2011 г.

могло способствовать более эффективному решению стоящих перед ними задач.

Эти задачи ГГО решает по настоящее время, являясь научно-исследовательским и научно-методическим центром Росгидромета по руководству актинометрическими наблюдениями и держателем режимно-справочного банка данных «Актинометрия», а также Мировым радиационным центром данных ВМО.

На протяжении ряда лет актинометрическая сеть в России расширялась. Пика своего развития она достигла в 1991 г., когда на территории России насчитывалось 275 пунктов актинометрических наблюдений. После распада СССР началось сокращение числа пунктов наблюдений, наиболее интенсивное в 1991—2003 гг., когда актинометрическая сеть России сократилась более чем на 30 % в основном за счет станций с сокращенной программой. Главной причиной сокращения сети стало отсутствие запасных приборов для замены вышедших из строя.

В последующие годы число пунктов наблюдений существенно не изменялось и колебалось от 187 до 192. Изменения числа станций актинометрической сети в период 1991—2011 гг. представлено на рис. 1.

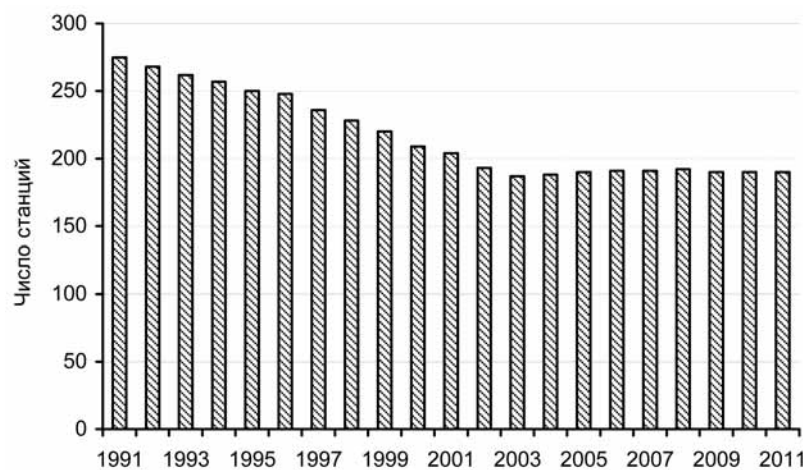


Рис. 1. Динамика актинометрической сети за период 1991—2011 гг.

Состояние актинометрической сети в настоящее время

По состоянию на январь 2011 г. актинометрическая сеть Росгидромета насчитывает 190 пунктов наблюдений, которые распределены по территории неравномерно: на европейской части России сеть более плотная, чем на азиатской.

Наблюдения проводятся по трем различным программам. Программа регистрации и программа срочных наблюдений (полная программа) предполагают выполнение измерений пяти основных составляющих радиационного баланса: прямой солнечной, рассеянной, суммарной и отраженной радиации, а также радиационного баланса. По сокращенной программе производятся измерения только суточных сумм суммарной радиации (Наставление, 1997).

В текущем году в 35 пунктах проводится непрерывная круглосуточная регистрация пяти видов радиации, по результатам которой определяются часовые, суточные и месячные суммы. В 80 пунктах выполняются срочные наблюдения за пятью видами радиации в шесть стандартных актинометрических сроков. По их результатам рассчитываются значения радиации в каждый срок, а также осредненные за месяц в каждый срок и месячные суммы. В 75 пунктах проводятся измерения суточных сумм суммарной радиации с последующим определением месячных сумм.

При этом из 20 российских станций международного обмена в настоящее время работает 11, остальные из-за выхода из строя технических средств не обеспечивают получение данных в требуемом объеме.

В подавляющем большинстве актинометрических пунктов до настоящего времени наблюдения проводятся с помощью неоднократно выработавших технический ресурс приборов по устаревшим технологиям.

Важнейшей задачей, требующей незамедлительного решения, является переоснащение актинометрической сети как для сохранения и наращивания рядов наблюдений, так и для качественного развития технологии получения информации.

Прекращение выпуска актинометрических приборов, связанное с распадом СССР, в течение последних лет стало одной из

главных причин нестабильности в работе сети. Неоднократные попытки специалистов ГГО организовать производство актинометрических датчиков в России долгое время оставались безрезультатными. Положительный сдвиг в решении этого вопроса наметился только в 2002 г., когда ГГО и ОАО «Пеленг» (г. Минск) начали совместные работы по организации выпуска табельных актинометрических приборов.

Модернизация актинометрической сети

Работы по модернизации актинометрической сети начались в 2005 г. в рамках Проекта модернизации и технического перевооружения учреждений и организаций Росгидромета на кредиты, выделяемые для этой цели Международным банком реконструкции и развития (МБРР). При реализации Проекта для переоснащения сети было закуплено 19 зарубежных автоматизированных актинометрических комплексов (ААК), предназначенных для обеспечения работы пунктов по программе непрерывной регистрации составляющих радиационного баланса. Один из комплексов предназначен для организации наблюдений по программе BSRN (Baseline Surface Radiation Network — всемирная сеть наблюдений для непрерывного измерения составляющих радиационного баланса у поверхности Земли (<http://www.gewex.org/bsrn.html>), 12 ААК обеспечивают наблюдения по стандартной программе, а шесть ААК — по расширенной программе, включающей также наблюдения за ультрафиолетовой радиацией в зонах А и Б. Все приборы, входящие в ААК, изготовлены фирмой Kipp&Zonen, Нидерланды.

Как показали результаты ранее выполненных в ГГО сравнительных наблюдений (Бычкова и др., 2008а), а также опыт использования приборов фирмы Kipp&Zonen на ряде станций Росгидромета в условиях высоких широт, эти приборы надежны, удобны в работе и обеспечивают сохранение рядов.

Комплекс для наблюдений по программе BSRN в 2010 г. установлен в Западно-Сибирском УГМС на станции Огурцово.

В 2011 г. комплексы ААК установлены в наблюдательных пунктах Якутск, Оймякон, Верхоянск, Хабаровск, Самара, Цимлянск, Южно-Сахалинск, Подмосковная, Иркутск, Екатеринбург, Владивосток, Магадан, Архангельск, Диксон, Чита, Омск, Петропавловск-Камчатский, Александровское (рис. 2). План размещения ААК в каждом пункте рассматривался и согласовывался в ГГО с учетом особенностей конкретной метеорологической площадки.

Методическое руководство модернизированной сетью, включая пункты с расширенной программой наблюдений, осуществляет ГГО, где составляются необходимые инструкции, методические письма и осуществляется контроль за внедрением новой техники.



Рис. 2. Автоматизированный актинометрический комплекс ААК на станции Подмосковная.

Установленные на сети ААК не введены в работу ввиду отсутствия необходимого программного обеспечения, разработка которого была начата лишь в августе 2011 г. с привлечением специалистов ГГО. Перед разработчиками стояла задача подготовить программу для обработки данных ААК при помощи используемой на сети системы SONE-6, позволяющей получать данные в форматах, принятых в функционирующем режимно-справочном банке данных «Актинометрия» и в Международном центре радиационных данных.

К настоящему моменту разработана первая версия программного обеспечения, которая апробирована на данных ААК за сентябрь 2011 г. в двух пилотных пунктах — Якутск и Подмосквовная. После рассмотрения на Методической комиссии ГГО это программное обеспечение будет внедряться в пунктах, имеющих комплексы ААК.

Отечественные разработки актинометрических приборов и оборудования

Ввиду крайне ограниченного числа зарубежных ААК вопрос о создании отечественного аналога не теряет актуальности.

Производство отечественных (российско-белорусских) технических средств для актинометрических наблюдений было возобновлено при участии ОАО «Пеленг» (Республика Беларусь) и ЦКБ ГМП ФГБУ «НПО «Тайфун» (Российская Федерация).

Идеология создания новых технических средств была определена ГГО, где также осуществлялось научно-техническое руководство всеми разработками.

В 2005—2008 гг. в ОАО «Пеленг» был освоен выпуск полной номенклатуры необходимых для сети актинометрических приборов с улучшенными характеристиками: актинометра «Пеленг СФ-12», пиранометра «Пеленг СФ-06» и балансомера «Пеленг СФ-08» (Бычкова и др., 2008б) (рис. 3).

Для получения данных о наличии и продолжительности солнечного сияния взамен гелиографа ГУ-1 разработан прибор «Пеленг ВК-05» (рис. 4), обеспечивающий автоматизацию измерений этого параметра.



Рис. 3. Актинометрические приборы ОАО «Пеленг».



Рис. 4. Прибор «Пеленг ВК-05» с индикаторным табло.

Актинометрические датчики комплектуются электронным измерительным блоком и цифровым индикаторным табло, обеспечивающими автоматизацию измерений часовых сумм радиации взамен аналогового самопишущего прибора КСП-4, стрелочного гальванометра ГСА, электролитического интегратора Х-603. Эти приборы обеспечивают работу пункта наблюдений по программам регистрации, срочных актинометрических наблюдений и интегрирования суточных сумм радиации.

Для наблюдений по программе регистрации требуются актинометр, три пиранометра, балансомер, два блока и два табло, имеющие в общей сложности шесть каналов, пять из которых служат для подключения рабочих датчиков, а шестой — для подключения контрольного или эталонного датчика.

Для срочных наблюдений требуются актинометр, пиранометр, балансомер и один трехканальный блок (без табло).

Для наблюдений по сокращенной программе требуются один пиранометр, одноканальный блок и табло. При этом прибор позволяет измерять не только суточные, но и часовые суммы радиации, что существенно повышает информативность данных. На станциях с сокращенной программой, оснащенных пиранометрами типа «Пеленг», могут (и должны) вводиться измерения часовых сумм радиации, что обеспечит перевод таких станций в разряд регистрирующих, хотя и одного вида радиации. Опыт такой работы уже имеется на ряде станций.

Все перечисленные приборы сертифицированы в Ростехрегулировании. Сертификаты об утверждении типа средств измерений выданы соавторам приборов: ОАО «Пеленг» и ГГО.

Внедрение приборов на сети осуществляется под методическим руководством ГГО. В период 2007—2011 гг. в ГГО разработаны и разосланы на сеть инструкции по использованию этих приборов по любой из трех программ наблюдений.

При вводе новых приборов в работу проводятся параллельные синхронные наблюдения продолжительностью не менее одного года. Результаты, полученные по приборам типа «Пеленг» и табельным приборам, присылаются в ГГО, где они анализируются и обобщаются. К настоящему времени такие наблюдения проводились в Северо-Западном, Северо-Кавказском, Якутском, Камчатском, Колымском УГМС (рис. 5—7).

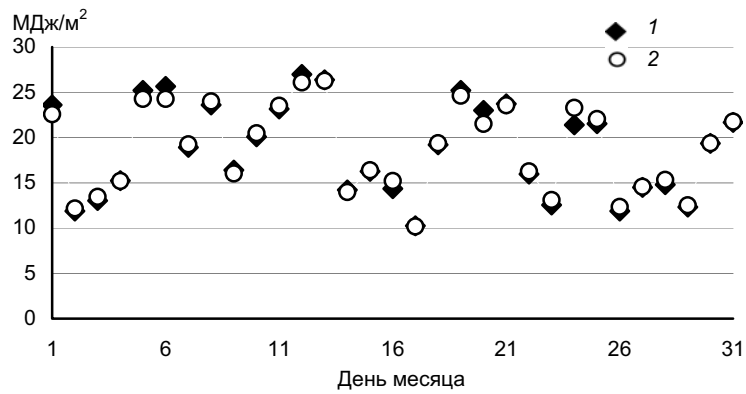


Рис. 5. Значения суточных сумм суммарной радиации, полученные по сокращенной программе в результате измерений пиранометрами М-80 (1) и «Пеленг СФ-06» (2).
Кисловодск, август 2007 г.

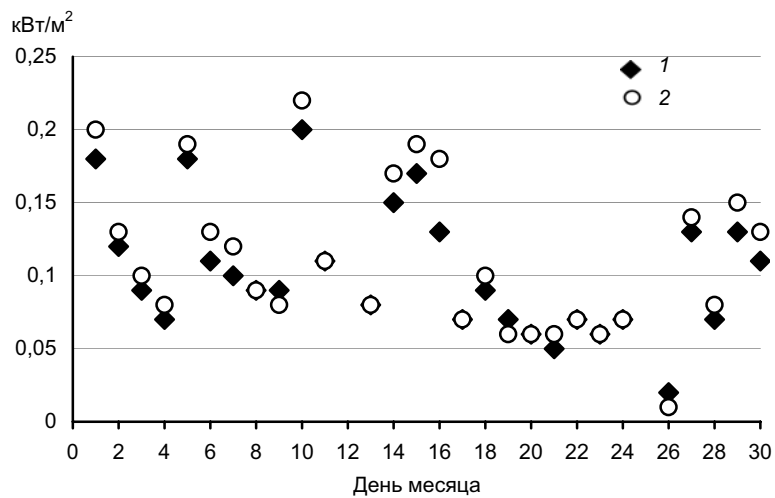


Рис. 6. Значения рассеянной радиации, полученные по программе срочных наблюдений в результате измерений пиранометрами М-80 (1) и «Пеленг СФ-06» (2).
Магадан, октябрь 2008 г., срок 09.30.

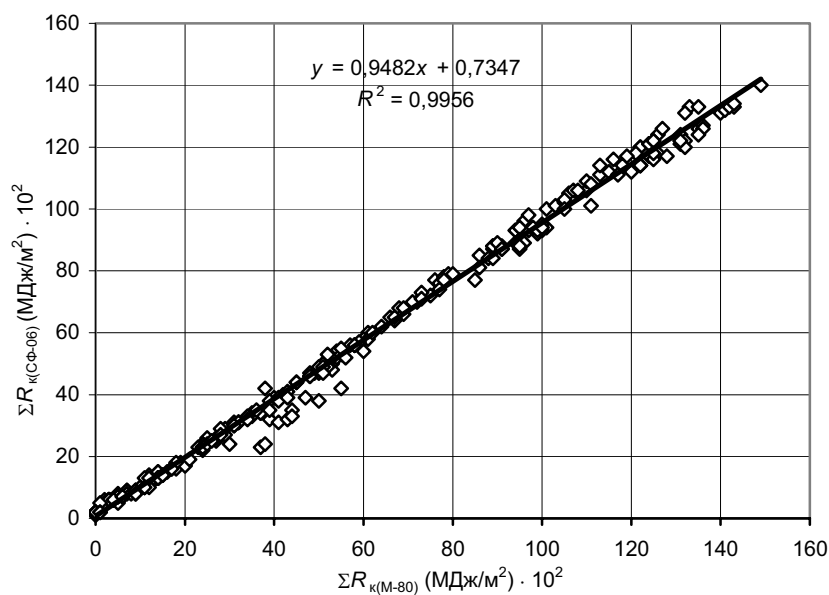


Рис. 7. Сравнение значений часовых сумм отраженной радиации (ΣR_k), полученных в результате измерений пиранометрами М-80 и «Пеленг СФ-06». Петропавловск-Камчатский, февраль 2008 г.

Анализ представленных материалов позволяет сделать вывод о сохранности накопленных рядов наблюдений в пределах допускаемой погрешности измерений.

При необходимости изготовитель обеспечивает гарантийный ремонт приборов.

К сожалению, темпы внедрения новых приборов на сети Росгидромета остаются медленными. По состоянию на август 2011 г. лишь в 22 пунктах работают новые приборы, в том числе полные комплекты: для сокращенной программы в трех пунктах; для срочных наблюдений в двух пунктах. Практически не внедряется прибор для автоматизированных измерений продолжительности солнечного сияния «Пеленг ВК-05», несмотря на его преимущества перед зарубежными аналогами.

Помимо приборов, на сети требуется также вспомогательное актинометрическое оборудование, предназначенное для размещения приборов на метеорологической площадке. Разработанное под научно-техническим руководством ГГО оборудование (стойка-стрела для пиранометров суммарной и отраженной радиации, теневые кольца для пиранометра рассеянной радиации и балансомера) выпускает ЦКБ ГМП «НПО «Тайфун». Там же налажен выпуск модернизированной актинометрической трубы для установки в ней пиранометра и балансомера при их поверке в естественных условиях по солнцу. Выпускается также модификация трубы, предназначенная для поверки пиранометров внедряемых зарубежных ААК.

Важным вкладом в создание автоматизированного комплекса стало освоение выпуска ЦКБ ГМП «НПО «Тайфун» блока центрального измерительного (БЦИ), на базе которого составляются актинометрические комплексы МФ-19 (рис. 8), используемые для наблюдений (например, на станциях Оренбург и Баренцбург, в антарктическом рейсе НЭС «Академик Федоров» и др.). Комплекс МФ-19, дополненный АРМ актинометриста, проходил эксплуатационные испытания на станции Якутск.

В 2010—2011 гг. в ОАО «Пеленг» разработан прибор слежения за солнцем ПСС-1 (рис. 9), осуществляющий автоматическое нацеливание актинометра на солнце и затенение пиранометра. В отличие от следящей системы фирмы Kipp&Zonen, входящей в состав ААК, прибор ПСС-1 не требует отдельного компьютера для обеспечения его работы.

Проведенные в ГГО испытания показали надежность ПСС-1 в работе и удобство в эксплуатации. Этот прибор завершает комплекс новых разработок для полной модернизации технического оснащения пунктов, работающих по стандартной программе регистрации. С его появлением появляется реальная возможность создания отечественного (российско-белорусского) автоматизированного актинометрического комплекса, подобного зарубежному ААК.

Программное обеспечение «АРМ актинометриста», разработанное в ГГО для российско-белорусских автоматизированных комплексов (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611561), помимо функций, реализован-



Рис. 8. Комплекс МФ-19 с ВЦИ.



Рис. 9. Прибор слежения за солнцем ПСС-1.

ных в проекте ПО ААК, обеспечивает получение данных также по программе срочных наблюдений (для станций, имеющих ряды таких данных), формирование расширенного состава метеорологических параметров, контроль данных и др.

Перспективы переоснащения актинометрической сети

Выполненный к настоящему времени этап модернизации на базе зарубежных комплексов ААК обеспечит переоснащение десятой части актинометрической сети. Работы по дальнейшему переоснащению должны затронуть оставшиеся 90 % актинометрических пунктов.

Как уже говорилось, пять пунктов оснащены комплектами приборов типа «Пеленг». Таким образом, непереоснащенными остаются 166 пунктов Росгидромета.

Полное переоснащение актинометрической сети Росгидромета будет достигнуто при условии переоснащения 32 пунктов с программой регистрации, 62 пунктов с программой срочных наблюдений, 72 пунктов с сокращенной программой. При этом целесообразно отдать предпочтение отечественным (российско-беларусским) разработкам, внедрение которых обеспечивает:

сохранение действующих методик измерений,

сохранение действующих методик поверки на базе существующих эталонов,

однородность рядов наблюдений,

возможность использования имеющегося на сети вспомогательного и поверочного оборудования.

Стоимость отечественного актинометрического комплекса значительно ниже, чем зарубежного. При этом его обслуживание и метрологическое обеспечение требуют меньших затрат, а сходимость с накопленными рядами данных гарантируется однотипностью принципов устройства приемных элементов датчиков с ранее выпускавшимися и подтверждено результатами сравнительных наблюдений.

Переоснащение актинометрической сети целесообразно проводить в три этапа с учетом практической значимости программ наблюдений:

этап 1 — переоснащение 32 пунктов, работающих по программе регистрации (стоимость технических средств примерно 27 700 тыс. рублей);

этап 2 — переоснащение 62 пунктов, работающих по программе срочных наблюдений (стоимость 20 500 тыс. рублей);

этап 3 — переоснащение 72 пунктов, работающих по программе интегрирования (стоимость 9000 тыс. рублей).

Общая стоимость переоснащения всех 166 пунктов порядка 57 200 тыс. рублей.

Заключение

Техническое переоснащение актинометрической сети Росгидромета к настоящему моменту не завершено.

Реализация первого этапа Проекта технического перевооружения учреждений и организаций Росгидромета на кредиты МБРР обеспечивает оснащение зарубежными комплексами ААК лишь 10 % общего числа актинометрических пунктов.

Техническое переоснащения остальных актинометрических пунктов целесообразно реализовать на базе менее дорогостоящих российско-беларусских технических средств, обеспеченных как методически, так и метрологически. Переоснащение возможно проводить поэтапно.

Для актинометрической сети Росгидромета требуется сохранение станций, выполняющих наблюдения по полной программе, и поддержание работы станций, включенных в международный обмен радиационными данными по линии ВМО.

Методическое руководство всей актинометрической сетью Росгидромета должно по-прежнему оставаться за ГГО. Для обеспечения наиболее эффективного руководства на базе метеостанции Воейково (при ГГО) необходимо создать станцию обсерваторского типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бычкова А. П., Луцько Л. В., Лыков А. Д., Соколенко С. А. (2008а). О сравнениях актинометрического комплекса фирмы Kipp&Zonen и табельных приборов Росгидромета // Труды ГГО. Вып. 558. С. 172—196.

Бычкова А. П., Казеев Ю. И., Кривонощенко В.И., Луцько Л. В., Соколенко С. А. (2008б). Новые приборы для актинометрических наблюдений на сети // Труды ГГО. Вып. 557. С. 133—146.

РД 52.04.562—96. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам (1997). Вып. 5. Актинометрические наблюдения. Часть 1. Актинометрические наблюдения на станциях. — М., Росгидромет. 222 с.

<http://www.gewex.org/bsrn.html>

УДК 551.340, 551.345, 551.510

**МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА УВЛАЖНЕНИЯ
ПОЧВЫ НА ЭВОЛЮЦИЮ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЭМИССИИ
МЕТАНА С ТЕРРИТОРИЙ ИЗБЫТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ
В СИБИРИ**

А. А. Пикалёва

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

Поступила в редакцию 7.06.2011
Поступила после доработки 10.08.2011

Введение

Из отчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) следует, что на протяжении последних нескольких десятков лет происходит повышение среднегодовой глобальной температуры воздуха. Одним из основных факторов, вызывающих потепление, считается повышение концентрации парниковых газов в атмосфере, в частности метана (IPCC, 2007). Проблемы изменяющегося температурного режима в субполярных широтах и водного режима грунтов в регионах избыточного увлажнения, в особенности в болотных экосистемах, находятся в настоящее время в центре внимания большого числа исследователей (Анисимов и др., 2007; Надёжина и др., 2011; Паников и др., 1993; Agarwal, Garg 2009; Christensen, Cox, 1995).

Изменение климата в северных регионах может вызвать увеличение интенсивности потока метана в атмосферу. Увеличение естественной эмиссии метана обычно связывают с усиливающейся деградацией вечной мерзлоты и изменением режима сезонного протаивания. При этом существует обратная связь между состоя-

нием многолетнемерзлых грунтов и газообменом углерода с атмосферой. Радиационное воздействие (Rf) углекислого газа составляет $+1,5 \text{ Вт/м}^2$. В то же время, Rf (CH_4) равен $+0,48 \pm 0,05 \text{ Вт/м}^2$. С учетом того, что его способность поглощать инфракрасное излучение в несколько раз больше, чем у CO_2 , оказывается, что влияние метана на потоки радиации в атмосфере сравнимо с воздействием углекислого газа.

В Третьем оценочном докладе МГЭИК (2001) отмечается, что количество метана в атмосфере на начало XX века увеличилось в сравнении с доиндустриальным периодом на $151 \pm 25 \%$, т.е. современная его концентрация составляет порядка 1800 ppb. В конце 1970-х — начале 1980-х годов фиксировалось увеличение концентрации метана на 16—17 ppb, соответствующее 1 % в год. Однако с начала 1990-х годов темпы роста концентрации метана уменьшились. Таким образом, оценка изменения естественной эмиссии метана под воздействием меняющегося климата представляет собой важную задачу, которая в настоящее время не имеет окончательного решения.

Болотные экосистемы играют важную роль в глобальном цикле эмиссии метана, являясь одним из его естественных источников. Стоит отметить, что только на территории Сибири болота занимают около 100 млн га (Botch, 1996). В условиях дефицита кислорода разложение органического вещества бактериями сопровождается выделением метана, определяя тем самым географическое положение границ его источников. Инвентаризация источников естественной эмиссии метана проводится постоянно, однако этот процесс нельзя считать полностью законченным. Реалистичные модельные оценки границ переувлажненных регионов являются условием надежности расчетов суммарных потоков метана с территории, где влажность повышена.

Оценки эмиссии метана обладают большой долей неопределенности, связанной как с недостаточной изученностью процесса его образования в естественных условиях, так и с несовершенством понимания механизма взаимодействия с атмосферой.

Существует лишь весьма ограниченное число климатических моделей, в состав которых входит интерактивный блок расчета эмиссии метана, учитывающий его взаимодействие с компонентами природной среды (Mokhov, Eliseev, 2008). Основой исследований, направленных на изучение пространственных распределений эмиссии метана, является определение вида зависимости потока метана от главных факторов, влияющих на него. К таким факторам можно отнести условия окружающей среды, прежде всего температуру и влажность почвы. В свою очередь, количество влаги в почве определяет положение уровня болотных вод (УБВ).

Сведения о взаимодействии теплового и влажностного влияния на эмиссию метана противоречивы. Различия в результатах данных натурных наблюдений обычно связывают с различиями в типах болот и большой изменчивостью характеристик эмиссии метана. С этим связаны трудности параметризации потоков метана на основе данных о температуре и влажности грунтов. В работе Petrescu et al. (2008) показано, что для болот, находящихся в северных регионах, эмиссия метана в большей степени регулируется УБВ, чем температурой. В то же время, согласно работе Cristensen, Cox (1995), в субарктических регионах в случае, если УБВ не опускается ниже 10—12 см, поток метана определяется в значительной степени температурой грунта.

В работе Надёжиной и др. (2011) проводился анализ чувствительности локальных и пространственных распределений эмиссии метана к выбору параметризации, определяющей поток метана. В частности, в этой работе анализировались результаты численных экспериментов по расчету эмиссии метана на основе параметрических соотношений между потоками метана, температурой и положением уровня грунтовых вод. При проведении экспериментов предполагалось, что болота могут встретиться на всей территории расчетной области, а уровень болотных вод либо задавался постоянным значением на протяжении всего теплого сезона, либо варьировался в соответствии с наблюдаемыми сезонными изменениями этой характеристики для разных участков

болотного микроландшафта. В отличие от исследования, результаты которого представлены в работе Надёжиной и др. (2001), в работе Denisov et al. (2010) поток метана, являющийся функцией температуры и степени увлажнения почвы, рассчитывался только для районов избыточного увлажнения, границы которых определялись пороговым значением влажности почвы, полученным в экспериментах с региональной климатической моделью ГГО.

Целью данной работы является анализ изменения естественной эмиссии метана с территории избыточного увлажнения в Сибири под влиянием потепления климата. Оценки эмиссии метана выполнены с использованием данных комплекса моделей: региональной климатической модели (РКМ) (Школьник и др., 2000) и модели теплопереноса в многолетнемерзлых грунтах (МГТ) (Malevsky-Malevich et al., 2001). Для оценок использованы данные о средней температуре слоя сезонного протаивания (T_g) и параметризация УБВ, основанная на характеристиках влажности почвы. Суммарная эмиссия метана с территории Сибири рассчитывается с учетом площади, занятой болотами смешанного типа. Приводятся оценки изменения пространственного распределения потока метана к середине XXI века (2041—2060 гг.) по отношению к современному климату (1981—2000 гг.).

1. Методы расчета и использованные модели

Настоящая работа основана на использовании эмпирической связи потока метана с температурой грунта и уровнем болотных вод. Расчет эмиссии метана выполнен на основе параметризации, полученной в результате систематизации данных наблюдений в Северной Америке и Канаде (Yuexin, 1999). В общем виде соотношение для потока метана F (мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) представляется следующей зависимостью:

$$F = A e^{bT_{zw} + cZ_w}, \quad (1)$$

где A , $b = 0,121$, $c = -0,0599$ — эмпирические коэффициенты; Z_w — уровень болотных вод; T_{z_w} — температура на уровне болотных вод. Коэффициент A в формуле (1) изменяется в зависимости от широты (всего выделены три диапазона широт, куда может попасть расчетная точка).

В режиме *offline* была задействована гидродинамическая модель регионального климата, включающая единый с моделью общей циркуляции атмосферы блок методов параметризации климатообразующих процессов с горизонтальным разрешением 25 км. Выходные данные РКМ обеспечивают информацию о распределении температуры поверхности (T_s) и влажности почвы в узлах регулярной сетки расчетной области, занимающей регионы Восточной и Западной Сибири. Очевидно, что параметризация (1) не предполагает использования значений температуры поверхности для расчета потока метана. Однако с учетом большой неопределенности параметрических соотношений можно попытаться выяснить, какую погрешность вносит замена T_{z_w} в формуле (1) на другие значения температуры.

Для анализа чувствительности расчетных значений потока метана к заданию температуры была проведена серия экспериментов по расчету эмиссии метана с помощью формулы (1) при замене T_{z_w} температурой поверхности T_s (РКМ ГГО) и средней температурой слоя сезонного протаивания T_g , полученной с помощью модели теплопередачи в грунтах. МТГ позволяет оценивать распределения температуры по глубине в узлах регулярной сетки, горизонтальное разрешение которой совпадает с разрешением региональной модели. МТГ основана на решении одномерного уравнения теплопроводности на переменной вертикальной сетке с шагом 0,1 см вблизи поверхности.

Общая картина пространственного распределения температур T_s и T_g одинакова, но различия в абсолютных значениях прослеживаются на всей территории. Максимальные значения темпера-

туры поверхности в среднем за летний сезон достигают 20 °С и более, в то время как T_g не превышает 11–12 °С, что связано с запаздыванием наступления максимума температуры на глубине по отношению к поверхности. На рис. 1 *a* показаны разности $T_s - T_g$ для современного климата. Наиболее заметное различие температур (более 9 °С) наблюдается на юге расчетной области,

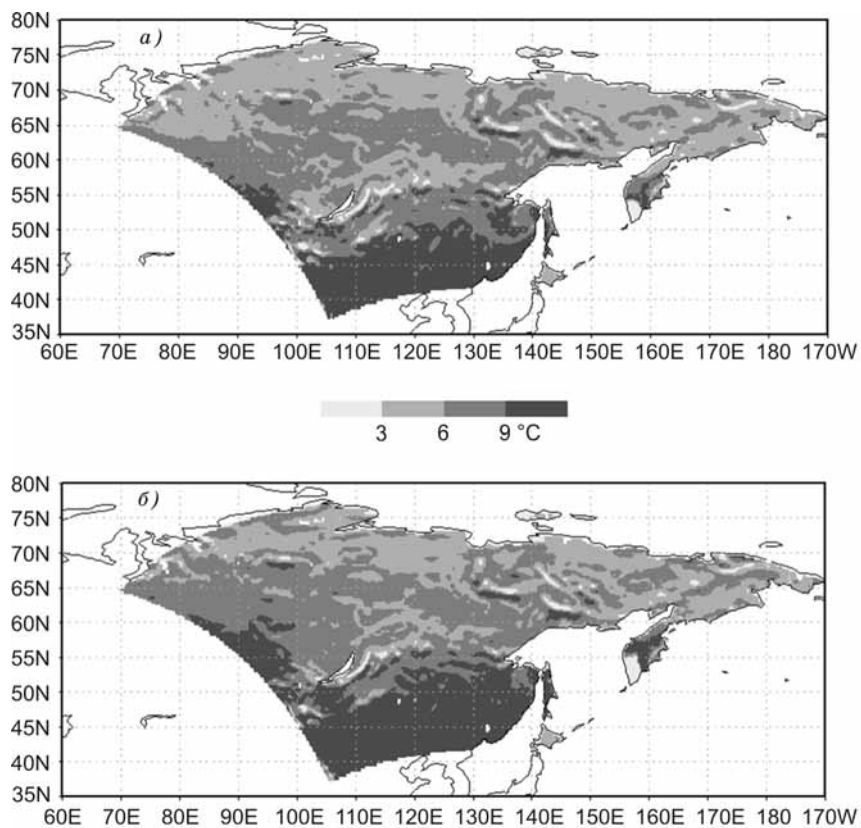


Рис. 1. Пространственное распределение разности температур $T_s - T_g$ при современном климате (*a*) и при климате, прогнозируемом на середину XXI века (*б*).

в центральных областях оно составляет от 6 до 9 °С, уменьшаясь к северным районам до 3 °С. В целом можно говорить о наличии зонального распределения этой характеристики. Однако в диапазоне широт 55—65° с. ш. отмечается уменьшение разности рассматриваемых температур, что может быть вызвано влиянием орографического строения местности. К середине XXI века ожидается смещение границы разности $T_s - T_g > 6$ °С к северу, особенно заметное в Западной Сибири (рис. 1 б).

Суточные данные РКМ о влажности почвы на четырех уровнях (до глубины 3 м) и данные о максимальной влагоемкости почвы использовались для расчета уровня грунтовых вод, который впоследствии учитывался в параметризации потока метана. Параметризация УБВ, представленная в работе Bohn et al. (2007) для территории Васюганских болот, дает удовлетворительную согласованность результатов расчетов УБВ с данными наблюдений. Уровень грунтовых вод определяется влажностью почвы и может быть получен с помощью выражения

$$Z_{wt} = \sum_{i=1}^4 (1 - Q_v) dz, \quad (2)$$

где dz — толщина i -го слоя (0,1; 0,25; 0,65 и 2 м).

Предполагалось, что насыщенный влагой объем почвы Q_v (в долях единицы) можно определить по формуле

$$Q_v = \frac{Q_i - Q_r}{Q_p - Q_r}, \quad (3)$$

где Q_i — объемная влажность почвы ($\text{м}^3 / \text{м}^3$), Q_r — остаточная влажность ($\text{м}^3 / \text{м}^3$), Q_p — пористость почвы.

На основе параметризации (1) с учетом температуры T_g и уровня болотных вод, рассчитанного с использованием формулы (2), были получены среднемесячные потоки метана за 20 лет для двух периодов (1981—2000 и 2041—2060 гг.).

2. Анализ численных экспериментов по распределению характеристик увлажнения

Влажность почвы является одной из важнейших характеристик при определении потока метана. Наряду со многими факторами степень увлажнения грунта оказывает влияние на создание анаэробных условий, которые необходимы для синтеза метана. Как показывают исследования, почвы мерзлотной зоны выделяют значительно больше метана, чем почвы за пределами криолитозоны (Паников и др., 1993).

Изменения общего количества осадков и температурного режима влияют на влажность почв и уровень болотных вод, что, в свою очередь, может привести к усилению или ослаблению производства метана. Поскольку мерзлота препятствует дренажу почв, то при потеплении климата изменение влажности верхних слоев почвы может оказаться значительным и привести к существенным изменениям в пространственном распределении метана. Глубокое протаивание многолетнемерзлых грунтов может привести к увеличению слоя обитания метаногенных микроорганизмов и усилению эмиссии с поверхности почв (Анисимов и др., 2005). Пространственное положение источников естественной эмиссии метана зависит, прежде всего, от пространственного распределения ВБУ, которое, в свою очередь, определяется распределением параметров увлажнения рассматриваемой территории.

Одной из характеристик климата является коэффициент увлажнения K , который представляет собой отношение количества осадков к величине испаряемости для данного ландшафта:

$$K = \frac{P}{E}, \quad (4)$$

где P — количество осадков (мм/мес), E — испаряемость (мм/мес).

Наиболее часто для расчета испаряемости используется эмпирическая формула, предложенная Н. Н. Ивановым (Иванов, 1959):

$$E = 0,0018(25 + T^2)(100 - f), \quad (5)$$

где T — среднемесячная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), f — относительная влажность воздуха (%).

Пространственное распределение коэффициента K оценивалось в расчетной области на основе выходных данных РКМ. Полученные результаты представлены на рис. 2. Наибольший интерес для нашей задачи представляет расположение зон избыточного увлажнения ($K > 1$). Территории, где $K \gg 1$, преимущественно находятся в Западной Сибири, в дельте реки Лены, на юго-востоке расчетной области и на Камчатке. В изменении коэффициента увлажнения прослеживается годовой ход (см. рис. 2 *a—в*). В летний период регионы с избыточным увлажнением занимают большую площадь, чем в осенне-весенний период, вследствие преобладания осадков над испарением. Отметим, что к середине XXI века (см. рис. 2 *з, е*) ожидается увеличение площади таких регионов в переходные месяцы (май, сентябрь), особенно на территории Западной Сибири и в районе реки Лены. В то же время, для летнего сезона (см. рис. 2 *д*) изменения в режиме увлажнения представляются менее значительными.

Выявление регионов с избыточным количеством осадков напрямую связано с характером увлажнения почвы, который оказывает непосредственное влияние на положение уровня болотных вод.

В данной работе в отличие от параметризации (3) использовался несколько иной подход к расчету характеристики увлажнения почвы. Вводилась зависимость Q_v через отношение количества влаги в почве к ее максимальной влагоемкости для данного типа почв (Q_{sat}):

$$Q_v = \frac{Q_i}{0,75Q_{sat}}. \quad (6)$$

Это отношение позволяет выявить области, где наблюдается избыточное увлажнение грунта (Q_v близко к единице). Пространственное распределение Q_v удовлетворительно согласуется с коэффициентом увлажнения. По распределениям таких характеристик хорошо выделяются районы избыточного увлажнения.

На основе соотношения (6) были выполнены оценки УБВ и проведен анализ пространственных распределений УБВ в условиях современного (рис. 3) и будущего климата. Области, где УБВ выходит на поверхность, также хорошо согласуются с регионами повышенного увлажнения, выделенными на основании распределения коэффициента K . Максимум УБВ (более 10 см над поверхностью) наблюдается на территории заболоченных районов Западной Сибири, вблизи реки Лены, Колымской низменности, выделяется район рек Анадыри и Камчатки.

Анализ представленных карт позволяет выделить годовой ход уровня болотных вод (см. рис. 3 *a—в*). В зимний период, когда практически полностью промерзает деятельный слой, мощность водоносного горизонта равна нулю. Наибольшее значение УБВ достигается в мае, что связано с процессом насыщения слоя сезонного оттаивания грунта талыми и дождевыми водами (Иванов и др., 1976). В летний период уровень грунтовых вод понижается вследствие увеличивающегося вклада процесса испарения с глубины протаивания. Поскольку конец августа и сентябрь являются периодом максимального оттаивания грунта, то наблюдается некоторое увеличение УБВ по сравнению с летним сезоном. Наибольшая разность в уровне болотных вод при современном и будущем климате наблюдается в переходные месяцы, причем особенно большой вклад в эту разность вносит май (рис. 4 *a*), в то время как для летнего сезона различия меньше (рис. 4 *б*).

Ранее указывалось, что к середине XXI века ожидаются значительные изменения в распределении коэффициента увлажнения на территории Сибири, особенно в переходные сезоны, однако уровень болотных вод изменяется не столь интенсивно.

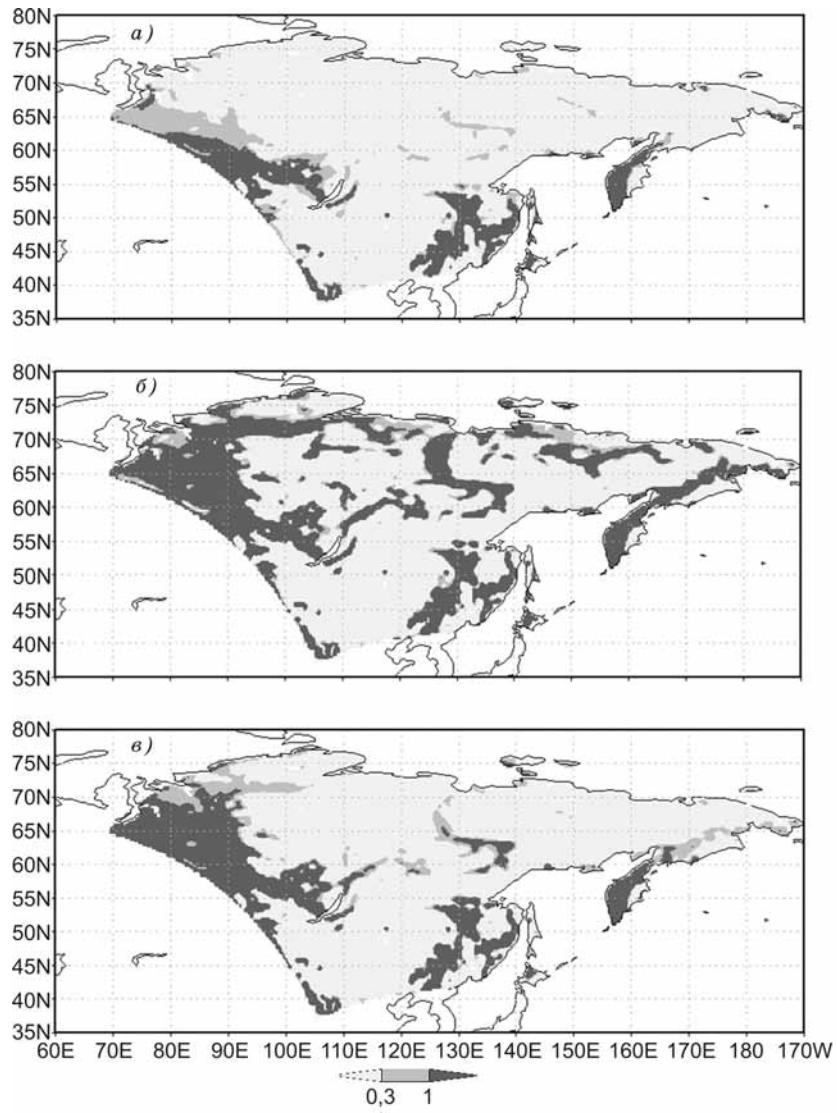
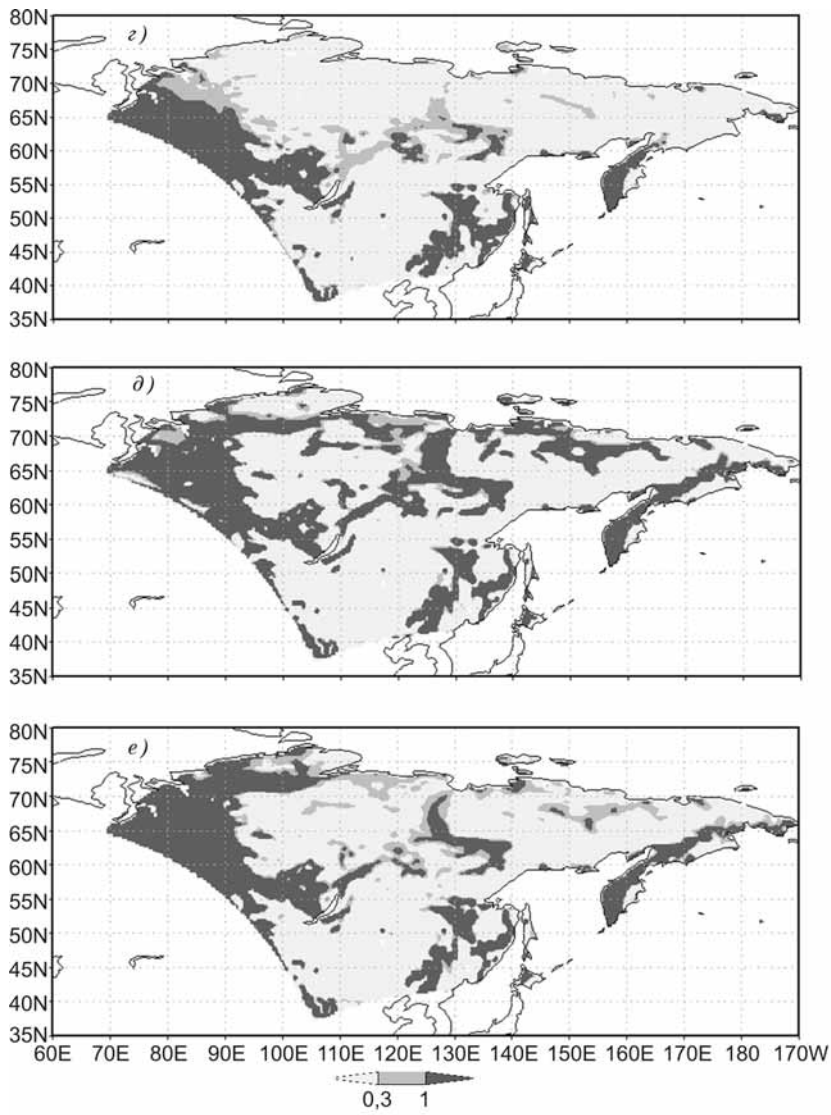


Рис. 2. Коэффициент
a—в — при современном климате: *a* — май, *б* — летний сезон, *в* — сентябрь;
д — летний сезон,



увлажнения.

z—*e* — при климате, прогнозируемом на середину XXI века: *z* — май,
e — сентябрь.

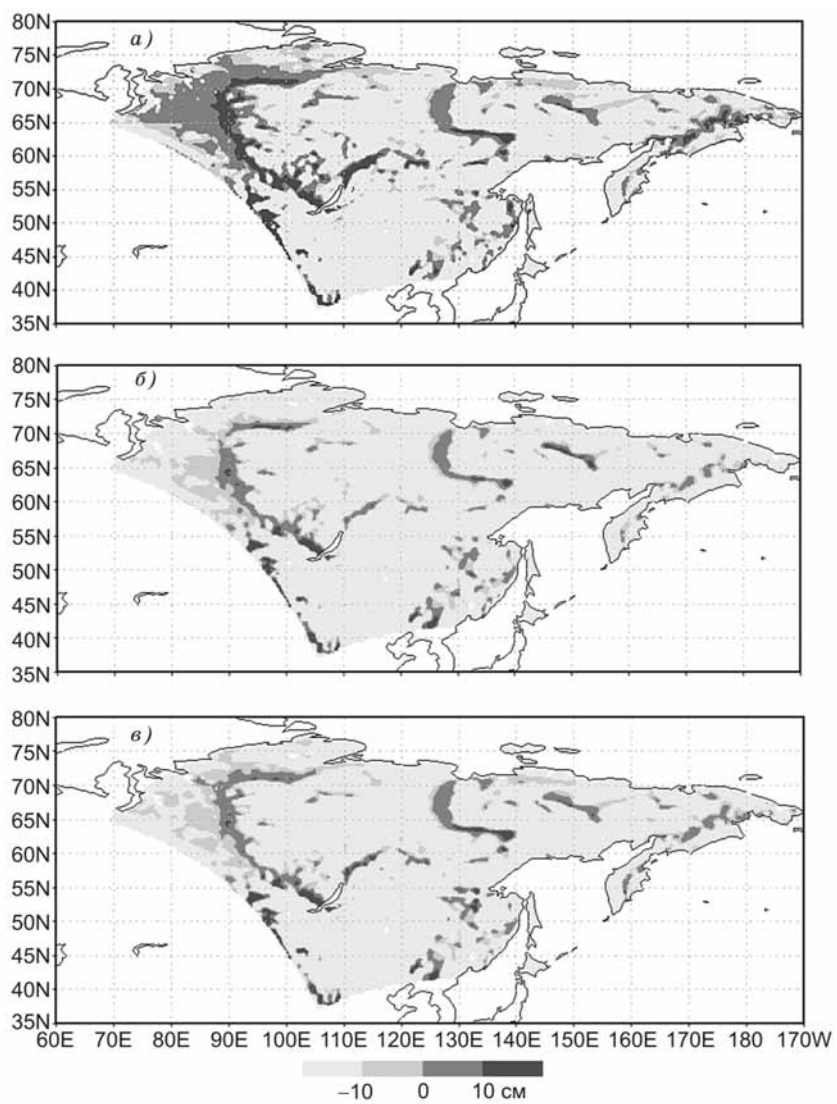


Рис. 3. Уровень болотных вод при современном климате ($Z_{wt} < 0$ — УБВ на глубине, $Z_{wt} > 0$ — УБВ на поверхности).

a — май, *б* — летний сезон, *в* — сентябрь.

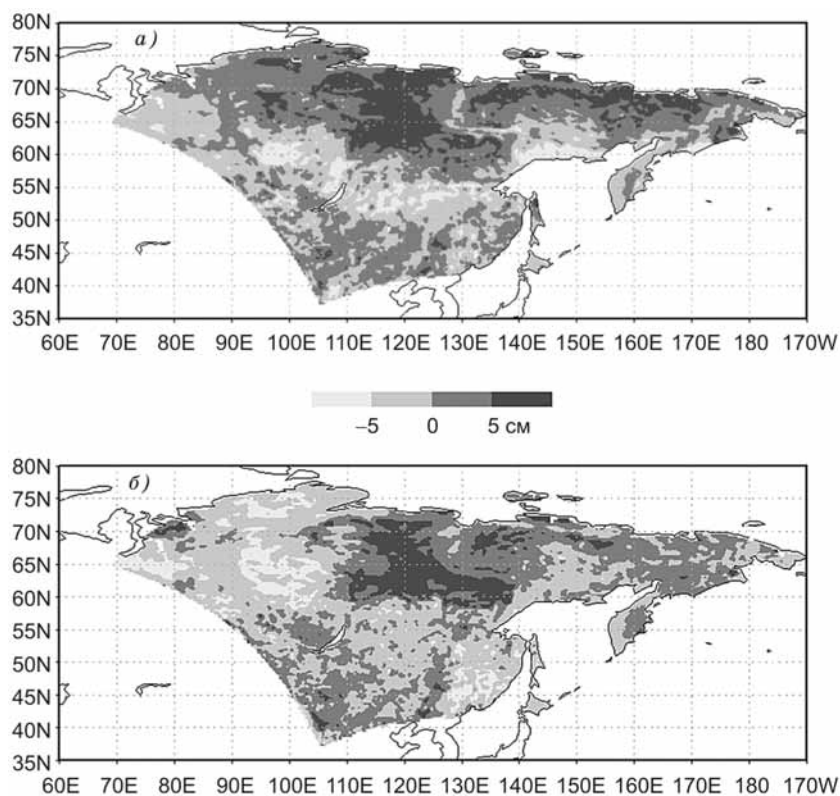


Рис. 4. Разность (см) между УБВ двух периодов.
a — май, *б* — летний сезон.

Это может быть связано с наличием естественного горизонтального стока, который не учитывается в параметризации влажностных характеристик РКМ. Следует иметь в виду, что рассматриваемая территория принадлежит к области существования многолетней мерзлоты и водоупором УБВ служит мерзлый слой (МС), мощность которого меняется во времени. Изменение мощности МС ведет к изменению стока через деятельный слой болот, что, в конечном счете, сказывается на величине и годовом ходе уровня воды (Иванов и др., 1976).

Таким образом, анализ пространственных распределений K , Q_v и УБВ позволяет выделить области повышенного увлажнения, причем положение границ этих областей слабо зависит от выбора характеристики увлажнения.

Сравнивая полученные карты (см. рис. 2 и 3) с распределением площади земель, занятых болотными экосистемами, по данным Института лесоведения РАН (рис. 5), можно сделать вывод об адекватности предложенной параметризации (6) при моделировании пространственного распределения УБВ.

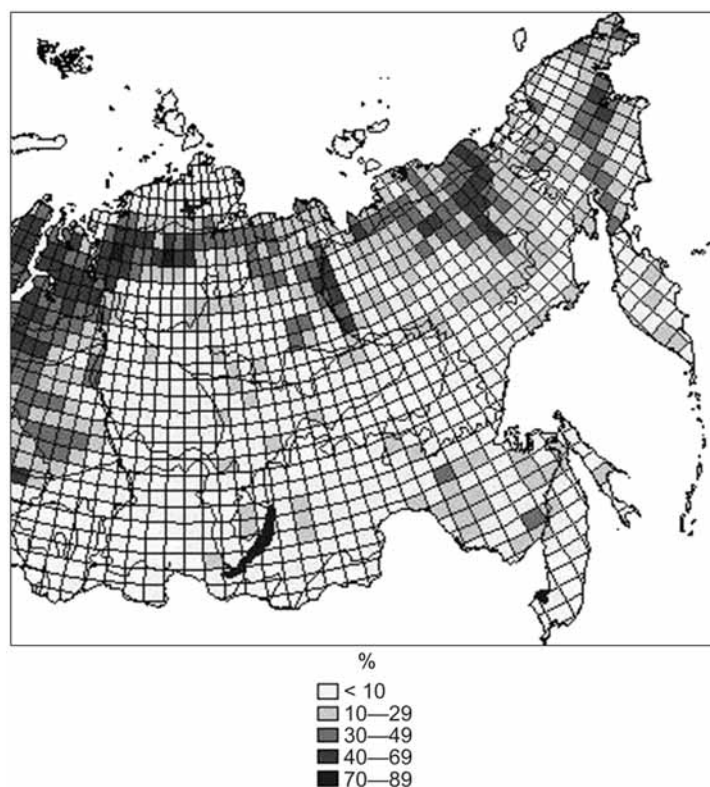


Рис. 5. Доля (%) площади земель, занятая болотными экосистемами, по данным Института лесоведения РАН.

3. Пространственное распределение потоков метана

Пространственное распределение потоков метана, полученное с использованием параметризации (1), представлено на рис. 6 *a—в*. Из рисунков следует, что пространственная картина распределения УБВ к середине века изменится незначительно по отношению к распределению в условиях климата конца XX века. В то же время, распределение средней за период 1981—2000 гг. температуры на глубине протаивания заметно отличается от соответствующего распределения за период 2041—2060 гг. По-видимому, основным фактором изменения эмиссии метана в этих условиях можно считать изменение температуры. Отметим, что полученные оценки требуют дальнейшего уточнения.

Выделение метана начинается только с момента установления положительного диапазона температур (май) и продолжается до момента перехода температуры через 0 °C (сентябрь—октябрь). В весенне-осенние месяцы скорость эмиссии варьирует от 1 до 3 мг/(м² · мес), увеличиваясь в некоторых точках до 5 мг/(м² · мес) (см. рис. 6 *a, в*). В летний сезон отмечается максимальный поток, который может достигать 6,5 мг/(м² · мес) (см. рис. 6 *б*). Сравнение расчетных распределений потоков метана с данными наблюдений (ICOS, 2009) свидетельствует о наличии общих закономерностей (см. рис. 6 *г*). Сезонный ход модельных распределений оказывается близким к полученному по данным наблюдений. Географическое положение модельных источников метана удовлетворительно описывается за счет достаточно хорошего представления моделью районов ВБУ. Например, в летний период отчетливо выделяются районы Западной Сибири, дельты реки Лены, Колымской низменности как по модельным, так и по экспериментальным данным (см. рис. 6 *б, г*).

Нельзя не отметить и различия: в мае поток метана в рассматриваемом регионе практически отсутствует, в то время как по расчетным данным источники метана уже достаточно четко выражены. Максимальные потоки по данным наблюдений дости-

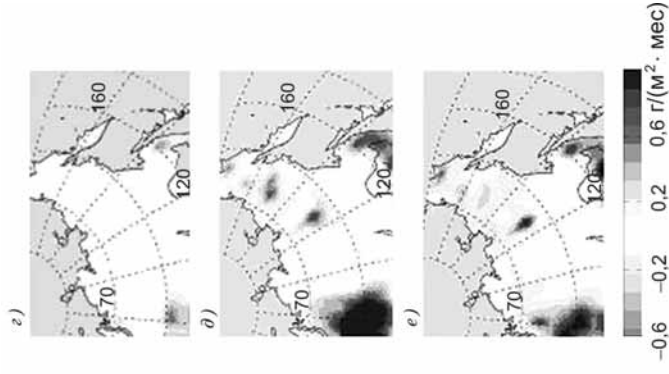
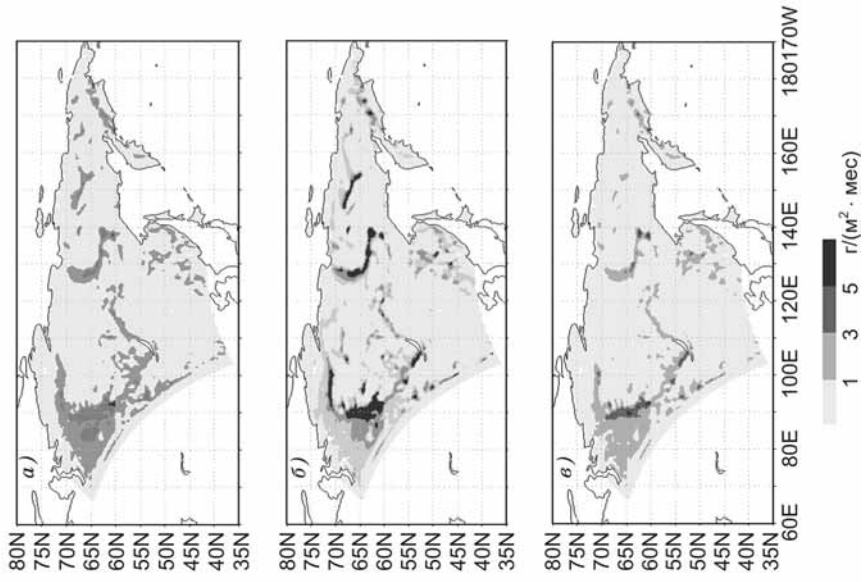


Рис. 6. Пространственное распределение эмиссии метана ($\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$) при современном климате. *a* — май; *б* — летний сезон; *в* — сентябрь; *г*–*е* — данные наблюдений за распределением потоков метана в мае (*г*), июле (*д*) и сентябре (*е*) (Isce_ref: standard inversion, сайт ICOS <http://www.carboscope.eu/>).

гают $1 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$, в то время как по модельным данным максимум составляет $\sim 7 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$. Однако следует иметь в виду, что на рис. 6 з представлены данные наблюдений за период с 2005 по 2007 г., в то время как расчетные значения потока метана осреднялись за двадцатилетний период. Дополнительную неопределенность в сравнительный анализ пространственных распределений эмиссии метана вносят различия разрешения модельных и экспериментальных данных.

Если при расчетах потоков метана вместо температуры T_g использовать температуру T_s , завышение расчетных значений по сравнению с экспериментальными оказывается большим. Так, эмиссия метана при использовании T_s увеличивается в 2 раза.

Были проведены оценки интегральной эмиссии метана за период с мая по сентябрь. Пространственное распределение эмиссии метана представлено на рис. 7, из которого видно, что к середине XXI века ожидается увеличение интенсивности потока метана, особенно в северных районах Западной Сибири и на Дальнем Востоке. Ожидается, что потоки метана в этих регионах составят более $25 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$. В то же время пространственное положение источников эмиссии практически не изменится.

При расчете суммарной эмиссии метана с территории Западной и Восточной Сибири учитывалась площадь, занятая болотными системами смешанного типа. Полученные оценки показали, что в среднем за 20 лет (1981—2000 гг.) суммарный поток составил $5,6 \text{ Мт}/\text{год}$, изменяясь в отдельные годы от $4,9$ до $6,1 \text{ Мт}/\text{год}$. Полученные оценки меньше оценок, приведенных в работе Denisov et al. (2010), где указывается, что для азиатской части России поток метана с 1991 по 2000 г. составил около $10 \text{ Мт}/\text{год}$. Полученное в данном исследовании увеличение суммарного потока метана с территории, занятой болотными экосистемами, к середине XXI века оказался близким к $7,3 \text{ Мт}/\text{год}$.

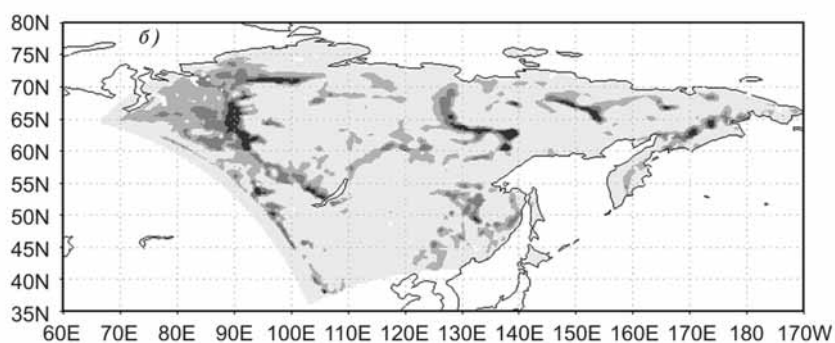
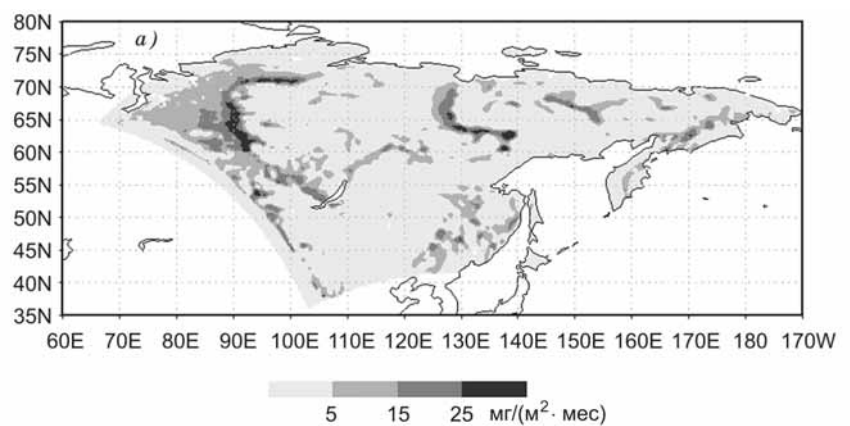


Рис. 7. Интегральная эмиссия метана за период с мая по сентябрь при современном климате (а) и при климате к середине XXI века (б).

Заключение

Для моделирования пространственного распределения естественной эмиссии метана из многолетнемерзлых болот территории Сибири были использованы данные региональной климатической модели ГГО, модель теплопереноса в грунте и параметризация потока метана, связывающая интенсивность эмиссии с температурой грунта и уровнем болотных вод. Основываясь на анализе полученных данных можно сделать вывод о том, что к середине

XXI века мощность источников метана возрастет. Ожидается увеличение суммарной естественной эмиссии метана в 1,3—1,5 раза. Расчетные значения эмиссии могут быть уточнены за счет расширения использования данных РКМ в области, полностью включающей в себя территорию Западной Сибири. Повысить надежность определения положения и интенсивности источников метана представляется возможным за счет детального районирования области распространения болотных экосистем, а также за счет учета конкретного типа ВБУ. Уточнение зависимости между эмиссией метана и факторами, определяющими скорость потока метана, может быть предметом дальнейших разработок.

Автор признателен Е. Д. Надёжиной и И. М. Школьнику за полезные советы в процессе выполнения работы.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 09-05-00874, № 10-05-00407-а, № 11-05-00733-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов О. А., Ершова А. А., Ренева С. А., Стрельченко Ю. Г. (2009). Многолетнемерзлые породы Северной Евразии в прошлом, настоящем и будущем: оценки, основанные на синтезе наблюдений и моделирования // Метеорология и гидрология.

Анисимов О. А., Лавров С. А., Ренева С. А. (2005). Оценка изменения эмиссии парниковых газов из многолетнемерзлых болот криолитозоны России в условиях глобального потепления. — В кн.: Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии // Под ред. Г. В. Менжулина. — СПб: Гидрометеоиздат, с. 114—138.

Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим (1976) / Под ред. К. Е. Иванова, С. М. Новикова. — Л.: Гидрометеоиздат. 447 с.

Водно-болотные угодья России. Т. 2. Ценные болота (1999) / Под ред. М. С. Боч // Wetlands International Publication. No. 49. 88 p.

Волперский С. Э., Иванов А. И., Цыганова О. П. и др. (1994). Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. № 12. С. 17—25.

Глаголев М. В., Сирин А. А., Лапшина Е. Д., Филиппов И. В. (2010). Изучение потоков углеродсодержащих парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири // Вестник ТГПУ. Вып. 3(93). С. 120—127.

Иванов Н. Н. (1959). Пояса континентальности земного шара // Изв. ВГО. Т. 91. Вып. 5. С. 19—22.

Мажитова Г. Г., Каверин Д. А. (2007). Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // Криосфера Земли. Т. XI, № 4. С. 20—30.

Надёжина Е. Д., Павлова Т. В., Школьник И. М., Молькентин Е. К., Семиошина А. А. (2010). Модельные оценки пространственных распределений характеристик снежного покрова и многолетнемерзлых грунтов на территории России // Криосфера Земли. 2010. № 2. С. 87—97.

Надёжина Е. Д., Молькентин Е. К., Семиошина А. А., Школьник И. М. (2011). Оценки эмиссии метана в регионах избыточного увлажнения Сибири с использованием данных региональной климатической модели // Метеорология и гидрология. № 6.

Паников Н. С., Титлянова А. А., Панеева М. В. и др. (1993). Эмиссия метана из болот юга Юго-Западной Сибири // Доклады АН СССР. Т. 330, № 3. С. 388—390.

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.

Agarwal R., Garg J. (2009). Methane emission modeling from wetlands and waterlogged areas using MODIS data // Current Science. V. 96, No. 1.

Anisimov O. A. (2007). Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // Environ. Res. Lett., 045016 (7pp), doi:10.1088/1748-9326/2/4/045016.

Bohn T. J., Lettenmaier D. P., Sathulur K. et al. (2007). Methane emissions from western Siberian wetlands: heterogeneity and sensitivity to climate change // Environ. Res. Lett., 2, 045015, doi:10.1088/1748-9326/2/4/045015.

Christensen T. R., Cox P. (1995). Response of methane emission from Arctic tundra to climatic change: result from a model simulation // Tellus B 47. P. 301—309.

De Jeu M., Wagner W., Holmes T., Dolman A., N. van de Giesen, J. (2008). Friesen global soil moisture patterns observed by space borne microwave radiometers and scatterometers // Surv. Geophys., 29:399—420, DOI 10.1007/s10712-008-9044-0.

Denisov S. N., Eliseev A. V., Mokhov I. I. (2010). Assessment of change in methane emissions from marsh ecosystems of Northern Eurasia in the 21st century using regional climate model results // Russian Meteorology and Hydrology. V. 45, No 2. P. 115—120. doi:10.3103/S1068373910020056.

Eliseev A. V., Mokhov I. I., Arzhanov M. M., Demchenko P. F., Denisov S. N. (2008). Interaction of the methane cycle in a processes in wetland ecosystems in a climate model of intermediate complexity // *Atmospheric and Ocean Physics*. V. 44, No 2. P. 139—152. doi:10.1134/S000143808020011.

Integrated Carbon Observation System (ICOS), CH₄ maps (2009). www.icos.infrastructure.eu.

IPCC (2007). Fourth assessment report (AR4).

Joris I., Feyen J. (2003). Modeling water flow and seasonal soil moisture dynamics in an alluvial groundwater-fed wetland // *Hydrology and Earth System Science*, 7(1). P. 57—66.

Letts M., Roulet N., Comer N., Skarupa M., Verseghy D. (2000). Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian Land Surface Scheme // *Atmosphere—Ocean*, 38 (1). P. 141—160.

Liblic L. K., Moore T. R., Bubier J. L., Robinson S. D. (1997). Methane emission from wetlands in the zone of discontinuous permafrost: Fort Simpson, Northwest Territories, Canada // *Global Biochemical Cycles*. V. 11, No. 4. P. 485—494.

Liu Yuexin (1996). Modeling the emissions of nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) from the terrestrial biosphere to the atmosphere // Massachusetts Institute of Technology Report. No. 10. P. 77—98.

Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D., Shklyarevich O. B. (2001). Numerical simulation of permafrost parameters distribution // *Cold Regions Sci. and Technol.* No. 32 P. 1—11.

Mokhov I. I., Eliseev A. V. (2008). Explaining the eventual transient saturation of climate carbon cycle feedback // *Carbon Balance and Management*, 3—4, doi: 10.1186/1750-0680-3-4.

Petrescu A. M. R., J. van Huissteden, M. Jackowicz-Korczynski et al. (2008). Modeling CH₄ emissions from arctic wetlands: effects of hydrological parameterization // *Biogeosciences*, 5. P. 111—121.

Roulet N., Moore T., Bubier P., Lafleur P. (1992). Northern fens: methane flux and climatic change // *Tellus*, 44 B. P. 100—1005.

Shurpali N., Verma S. (1998). Micrometeorological measurements of methane flux in a Minnesota peatland during two growing seasons // *Biogeochemistry*. V. 40. P. 1—15.

Tingting Li, Yao Huang, Wen Zhang, Changchun Song (2009). CH₄MODwetland: a biogeophysical model for simulating methane emissions from natural wetlands // *Ecol. Model.*, doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.05.07.

Tzimopoulos C., Sakellariou-Makrantonaki M. (1996). A new analytical model to predict the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Water Resources Management, 10. P. 397—414.

Walter B. P., Heimann M., Matthews E. (2001). Modeling modern methane emissions from natural wetlands // J Geoph. Res. V. 106, No. D24. P. 34207—34219.

Wille C., L. Kutzbach, T. Sachs, D. Wagner, E.-M. Pfeifer (2008). Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: eddy covariance measurements and modeling // Global Change Biology, 14. P. 1395—1408. doi; 10.1111/j.1365-2486.2008.01586x.

Zhuang Q., J. M. Melillo, D. W. Kicklighter et al. (2004). Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biochemistry model // Global Biochemical Cycles. V. 18. GB3010. doi:10.1029/2004GB002239,2004.

УДК 551.5: 001.891.57

**ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ
ЗАПАСОВ ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ И СОСТАВЛЯЮЩИХ
УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
ПАХОТНЫХ ПОЧВ**

А. К. Семендяев

Всероссийский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной метеорологии
249038 Обнинск, пр. Ленина, д. 82
E-mail: artem.semendyaev@mail.ru

Поступила в редакцию 1.08.2010

Ключевыми параметрами при прогнозировании состояния посевов и ожидаемой продуктивности сельскохозяйственных культур могут служить запасы продуктивной влаги и составляющие углеродного баланса органического вещества как характеристики эффективного плодородия почвы.

Запасы продуктивной влаги относятся к сложным для определения и анализа агрометеорологическим параметрам. Так, применяемый на наблюдательной сети Росгидромета термостатно-весовой метод определения влажности почвы не вполне удовлетворяет требованиям практики по точности измерений и по репрезентативности получаемой информации, а также из-за трудоемкости технологии. Главным недостатком метода является то, что результаты измерений характеризуют сравнительно небольшие участки, в то время как влагозапасы почвы чрезвычайно изменчивы в пространстве и во времени.

Значительная пространственная изменчивость физических полей почвенного увлажнения, зависящая от большого числа разнородных факторов, обусловила необходимость поиска метода получения информации о влагозапасах почвы на больших пло-

щадах. Таким методом стал расчетный метод, основанный на использовании метеорологической информации.

Проблемой связи водного режима почв с метеорологическими условиями занимались многие исследователи. В частности, в работе Вериги, Разумовой (1963) были предложены методы расчета динамики запасов продуктивной влаги для различных периодов вегетации по статистическим уравнениям для черноземных и оподзоленных почв. Эти методы в настоящее время используются в системе агрометеорологического обеспечения Росгидромета. Весенние влагозапасы рассчитываются на основе дефицита запасов продуктивной влаги осенью и суммы осадков за зимне-весенний период. Для расчета влагозапасов почвы в период вегетации используются средняя за декаду температура воздуха, сумма осадков за декаду и запасы продуктивной влаги к началу декады. Основным недостатком исходной схемы расчета динамики запасов продуктивной влаги является необходимость задания условий на начало вегетационного периода.

В предлагаемой нами динамико-статистической схеме непрерывного круглогодичного мониторинга такая необходимость устранена. Кроме того, эта схема предполагает дифференцированный по регионам учет разнообразия почв на всей исследуемой территории.

Реализованная в ВНИИСХМ схема мониторинга динамики запасов продуктивной влаги (Сиротенко и др., 2008) и углеродного баланса органического вещества пахотных почв (Сиротенко и др., 2011) охватывает 30 регионов Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов. Она позволяет решать как задачи прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Русской равнины, так и задачи оценки влияния изменений климата на сельское хозяйство. Расчеты ведутся для пахотного и метрового слоев почвы круглогодично.

Начальные запасы продуктивной влаги для заданного многолетнего периода задаются один раз в октябре. Для холодного периода года используется уравнение

$$W_{III} = W_X + bT_z \frac{W_X}{W_z} + cR_z \left(1 - \frac{W_X}{W_z} \right) + d, \quad (1)$$

где

$$T_z = \frac{1}{6} (T_X^{i-1} + T_{XI}^{i-1} + T_{XII}^{i-1} + T_I^i + T_{II}^i + T_{III}^i),$$

$$R_z = 0,5R_X^{i-1} + R_{XI}^{i-1} + R_{XII}^{i-1} + R_I^i + R_{II}^i + R_{III}^i;$$

I, II, ..., XII — календарные месяцы (k); $i, i - 1$ — текущий и предшествующий годы; W_k — средние за k -й месяц запасы продуктивной влаги; T_k^i — среднемесячная температура воздуха за k -й месяц в i -м году; R_k^i — сумма осадков за k -й месяц в i -м году; W_z — константа, равная 45 для пахотного слоя и 180 для метрового; b, c, d — индивидуальные для каждого субъекта РФ эмпирические коэффициенты.

В качестве примера в табл. 1 приведены используемые в уравнении (1) коэффициенты b, c, d для Воронежской, Саратовской и Волгоградской областей.

Таблица 1

Коэффициенты b, c, d для расчета влагозапасов пахотного и метрового слоев почвы в марте

Область	0—20 см			0—100 см		
	b	c	d	b	c	d
Воронежская	1,65	0,11	10,69	5,94	0,44	5,37
Саратовская	1,36	0,18	7,99	0,26	0,64	3,29
Волгоградская	4,45	0,15	8,38	8,32	0,49	21,04

Для расчета средних за k -й месяц значений запасов продуктивной влаги в пахотном слое (Wp_k) для теплого периода (апрель—октябрь) используется уравнение вида

$$Wp_k = a_k Wp_{k-1} + b_k T_k + c_k (R_{k-1} + R_k) + d_k, \quad (2)$$

где a_k , b_k , c_k , d_k — индивидуальные для каждого субъекта РФ эмпирические коэффициенты по месяцам.

Для расчета среднемесячных значений запасов продуктивной влаги в метровом слое для теплого периода используется уравнение вида

$$W_k = b_k W_{k-1} + c_k Wp_k + d_k. \quad (3)$$

Получены следующие оценки точности прогностических уравнений для расчета влагозапасов в пахотном и метровом слоях почвы (табл. 2). Для пахотного слоя почвы среднее значение коэффициента корреляции между рассчитанными значениями влагозапасов и данными наблюдений составляет 0,741—0,787, для метрового слоя почвы — 0,646—0,693. Таким образом, схема обеспечивает непрерывный расчет влагозапасов почвы на протяжении заданного числа лет.

Значимость влагозапасов почвы как одного из предикторов урожайности можно оценить по тесноте статистических связей с урожайностью сельскохозяйственных культур. В табл. 3 представлены осредненные по 30 регионам Русской равнины оценки коэффициентов корреляции между урожайностью зерновых культур и запасами продуктивной влаги в мае—июне.

Из табл. 3 следует, что использование восстановленных значений влагозапасов вместо данных наблюдений обеспечивает в подавляющем большинстве случаев определенное приращение информативности данного показателя для расчета урожайности. Очевидно, это связано с тем, что восстановленные ряды являются более репрезентативными для территории субъектов РФ и менее подвержены пространственной изменчивости.

Не менее важным фактором при определении ожидаемой продуктивности сельскохозяйственных культур является углеродный баланс органического вещества, который в значительной

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между значениями влаготпасов, полученными в результате расчета
и по данным измерений за 1951—1977 гг.

Область	0—20 см					0—100 см				
	V	VI	IX	X	X	V	VI	IX	X	X
	Белгородская	0,860	0,809	0,628	0,701	0,701	0,737	0,820	0,604	0,640
Брянская	0,655	0,727	0,720	0,668	0,668	0,520	0,653	0,720	0,650	0,650
Владимирская	0,681	0,833	0,891	0,778	0,778	0,489	0,546	0,736	0,630	0,630
Волгоградская	0,807	0,692	0,697	0,837	0,837	0,612	0,593	0,528	0,633	0,633
Воронежская	0,824	0,790	0,656	0,756	0,756	0,822	0,798	0,506	0,663	0,663
Нижегородская	0,916	0,859	0,886	0,810	0,810	0,795	0,798	0,787	0,738	0,738
Ивановская	0,773	0,775	0,828	0,835	0,835	0,704	0,631	0,744	0,811	0,811
Калужская	0,615	0,786	0,851	0,841	0,841	0,615	0,639	0,814	0,737	0,737
Костромская	0,673	0,782	0,842	0,699	0,699	0,624	0,741	0,812	0,709	0,709
Краснодарский край	0,750	0,862	0,599	0,680	0,680	0,708	0,796	0,540	0,689	0,689
Самарская	0,715	0,789	0,856	0,879	0,879	0,715	0,703	0,745	0,761	0,761
Курская	0,819	0,903	0,758	0,842	0,842	0,714	0,875	0,643	0,794	0,794
Липецкая	0,659	0,559	0,393	0,623	0,623	0,686	0,522	0,213	0,610	0,610
Московская	0,687	0,764	0,847	0,892	0,892	0,680	0,713	0,846	0,789	0,789
Орловская	0,728	0,799	0,785	0,844	0,844	0,437	0,657	0,755	0,787	0,787
Пензенская	0,867	0,793	0,798	0,776	0,776	0,819	0,683	0,536	0,684	0,684
Ростовская	0,855	0,863	0,747	0,830	0,830	0,713	0,782	0,527	0,545	0,545
Рязанская	0,583	0,892	0,863	0,907	0,907	0,592	0,853	0,833	0,855	0,855
Саратовская	0,845	0,778	0,781	0,866	0,866	0,677	0,714	0,585	0,588	0,588

Окончание табл. 2

Область	0—20 см					0—100 см				
	V	VI	IX	X	V	VI	IX	X	IX	X
	Ставропольский край	0,798	0,838	0,625	0,678	0,628	0,706	0,424	0,646	0,424
Тамбовская	0,828	0,812	0,772	0,727	0,746	0,824	0,733	0,563	0,733	0,563
Татарстан	0,650	0,860	0,864	0,779	0,582	0,676	0,777	0,738	0,777	0,738
Ульяновская	0,733	0,599	0,781	0,773	0,514	0,568	0,683	0,689	0,683	0,689
Чувашия	0,812	0,689	0,751	0,749	0,565	0,235	0,468	0,589	0,468	0,589
Ярославская	0,398	0,828	0,729	0,634	0,456	0,804	0,847	0,756	0,847	0,756
<i>Среднее</i>	<i>0,741</i>	<i>0,787</i>	<i>0,758</i>	<i>0,776</i>	<i>0,646</i>	<i>0,693</i>	<i>0,656</i>	<i>0,692</i>	<i>0,656</i>	<i>0,692</i>

Таблица 3

Среденные по 30 регионам Русской равнины оценки коэффициента корреляции связи урожайности — влагозапасы почвы по данным за 1967—2009 гг.

Месяц	Слой почвы, см	Результаты расчетов				Данные измерений			
		Озимая пшеница	Озимая рожь	Яровой ячмень	Зернов. и зернооб.	Озимая пшеница	Озимая рожь	Яровой ячмень	Зернов. и зернооб.
Май	0—20	0,41	0,4	0,30	0,40	0,31	0,37	0,31	0,38
	0—100	0,36	0,41	0,31	0,40	0,18	0,26	0,21	0,26
Июнь	0—20	0,53	0,57	0,58	0,64	0,33	0,38	0,45	0,49
	0—100	0,49	0,54	0,51	0,59	0,26	0,31	0,40	0,43

степени влияет на динамику доступных форм азота, фосфора и калия и тем самым детерминирует процессы роста и продуктивности растений.

В представленной схеме мониторинга используется модифицированная О. Д. Сиротенко (2002) версия модели RothC (Coleman, Jenkinson, 1996). Органический углерод почвы разделяется на четыре активных пула, которые представлены легко разлагаемыми растительными остатками C_1 , трудно разлагаемым растительным материалом C_2 , микробной биомассой C_3 и гумифицированным органическим веществом C_4 . Система уравнений для расчета составляющих углеродного баланса органического вещества имеет следующий вид:

$$V_i^j = C_i^j \left[1 - \exp \left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} \frac{k_i}{12} \right) \right],$$

$$V^j = V_1^j + V_2^j + V_3^j + V_4^j,$$

$$C_1^{j+1} = C_1^j \exp \left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} \frac{k_1}{12} \right) + 0,59R^{j+1} + 0,49F^{j+1},$$

$$C_2^{j+1} = C_2^j \exp \left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} \frac{k_2}{12} \right) + 0,41R^{j+1} + 0,49F^{j+1},$$

$$C_3^{j+1} = C_3^j \exp \left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} \frac{k_3}{12} \right) + 0,46V^j P_x,$$

$$C_4^{j+1} = C_4^j \exp \left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} \frac{k_4}{12} \right) + 0,54V^j P_x + 0,02F^{j+1}, \quad (4)$$

где a^j — зависимость скорости разложения органического вещества почвы (ОВП) от температуры; b^j — зависимость скорости разложения ОВП от влажности почвы; c^j — коэффициент, равный 0,6

при наличии растительного покрова и единице при его отсутствии; k_1, k_2, k_3, k_4 — скорости минерализации пулов; R^{j+1} — количество растительных остатков; F^{j+1} — количество внесенных органических удобрений; V^j — суммарные потери органического углерода за данный месяц; P_x — зависящая от механического состава почвы (содержания физической глины) доля потерь V^j .

Для целей прогнозирования урожайности зерновых культур представляют интерес два показателя — суммарная скорость разложения четырех фракций ОВП за октябрь предшествующего года (V_{op10}) и скорость разложения гумусной фракции за период с марта по май (V_{v4}). В табл. 4 представлены оценки тесноты статистических связей данных показателей и урожайности сельскохозяйственных культур за 1967—1995 гг. для 30 регионов Русской равнины.

Достаточно тесная связь наблюдается между урожайностью зерновых и суммарной скоростью разложения четырех фракций ОВП за октябрь предшествующего года: для озимой пшеницы средний коэффициент корреляции составляет 0,406, для озимой ржи — 0,463, для ярового ячменя — 0,337, для всех зерновых и зернобобовых в целом — 0,437. Для яровых культур теснота связи V_{op10} и V_{v4} с урожайностью ниже, чем для озимых культур и всех зерновых в целом. Таким образом, наличие значимых статистических связей между скоростью разложения органического вещества и урожайностью следующего года позволяет использовать этот показатель для прогнозирования в комплексе с другими предикторами, определяемыми в процессе мониторинга.

На основе рассчитанных рядов запасов продуктивной влаги и запасов углерода в пахотном слое почвы были получены четыре вида уравнений для урожайности основных зерновых культур (для прогноза в октябре, апреле, мае и июне):

$$Y_{10} = aV_{op10} + bn + cn^2 + dn^3,$$

$$Y_4 = aV_{op10} + bV_{v4} + cn + dn^2 + en^3,$$

$$Y_5 = aV_{op10} + bV_{v4} + cT_5 + dW_5 + en + fn^2 + gn^3,$$

$$Y_6 = aV_{op10} + bV_{v4} + cT_5 + dW_5 + eT_6 + fW_6 + gn + hn^2 + in^3, \quad (5)$$

где Y_{10} , Y_4 , Y_5 , Y_6 — прогнозируемая урожайность; V_{op10} — суммарная скорость разложения четырех фракций ОВП за октябрь предшествующего года; V_{v4} — скорость разложения гумусной фракции за период с марта по май; T_5 и T_6 — средняя температура за май и июнь соответственно; W_5 и W_6 — запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы за май и июнь соответственно; $n = 1, 2, 3, \dots$ — номер года; $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ — индивидуальные для каждого региона коэффициенты.

В табл. 5 представлены множественные коэффициенты корреляции (R) полученных уравнений. Средний коэффициент корреляции для прогноза урожайности озимых культур в мае достаточно высок ($R > 0,7$). Для озимой пшеницы он составляет 0,714, для озимой ржи — 0,706. Для ярового ячменя средний коэффициент корреляции для прогноза в июне составляет 0,715, для всех зерновых и зернобобовых в целом — 0,755. Высокие коэффициенты корреляции позволяют сделать вывод о том, что ежемесячный численный мониторинг запасов продуктивной влаги и составляющих углеродного баланса органического вещества пахотных почв обеспечивает ежемесячные прогнозы урожайности зерновых культур (начиная с мая) примерно для 75 % субъектов РФ.

В связи с проблемой исследования влияния наблюдаемых изменений климата на продуктивность сельского хозяйства нами выполнена оценка тренда влагозапасов почвы совместно с трендами температуры воздуха и осадков. Осредненные по 30 регионам Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов тренды температуры воздуха, осадков и рассчитанных влагозапасов почвы представлены в табл. 6.

Таблица 4

Оценки тесноты статистических связей урожайности сельскохозяйственных культур, суммарной скорости разложения четырех фракций ОВП за октябрь предшествующего года и скорости разложения гумусной фракции за период с марта по июнь по данным за 1967—2009 гг.

Область	Суммарная скорость разложения четырех фракций ОВП за октябрь предшествующего года				Скорость разложения гумусной фракции за период с марта по май			
	Озимая пшеница	Озимая рожь	Яровой ячмень	Зерновые	Озимая пшеница	Озимая рожь	Яровой ячмень	Зерновые
	Белгородская	0,562*	0,598*	0,411*	0,551*	0,459*	0,483*	0,434*
Брянская	0,378*	0,446*	0,320*	0,469*	0,487*	0,327*	0,271	0,372*
Владимирская	0,265	0,304	0,249	0,295	0,513*	0,477*	0,178	0,286
Волгоградская	0,327*	0,417*	0,031	0,352*	0,565*	0,569*	0,201	0,533*
Воронежская	0,360*	0,436*	0,312*	0,369*	0,511*	0,443*	0,346*	0,446*
Нижегородская	0,526*	0,558*	0,476*	0,599*	0,480*	0,364*	0,319*	0,360*
Ивановская	0,394*	0,489*	0,287	0,332*	0,429*	0,441*	0,212	0,227
Калужская	0,595*	0,667*	0,513*	0,632*	0,164	0,127	0,099	0,105
Костромская	0,163	0,339*	0,191	0,225	0,140	0,305	0,263	0,340*
Краснодарский край	0,551*	0,444*	0,097	0,475*	0,725*	0,593*	0,356*	0,645*
Самарская	0,038	0,131	0,247	0,170	0,343*	0,409*	0,110	0,314*
Курская	0,558*	0,708*	0,404*	0,534*	0,359*	0,249	0,263	0,297
Липецкая	0,626*	0,691*	0,620*	0,695*	0,302	0,239	0,180	0,223

Марий Эл	0,301	0,481*	0,181	0,374*	0,272	0,239	0,025	0,148
Мордовия	0,530*	0,539*	0,521*	0,621*	0,434*	0,346*	0,207	0,276
Московская	0,546*	0,598*	0,416*	0,519*	0,356*	0,516*	0,019	0,155
Оренбургская	0,161	0,081	0,361*	0,325*	0,353*	0,441*	0,164	0,239
Орловская	0,708*	0,740*	0,684*	0,778*	0,297	0,199	0,212	0,225
Пензенская	0,051	0,171	0,132	0,112	0,421*	0,232	0,142	0,200
Ростовская	0,329*	0,277	0,014	0,271	0,483*	0,557*	0,315*	0,458*
Рязанская	0,600*	0,611*	0,545*	0,696*	0,403*	0,272	0,238	0,312*
Саратовская	0,012	0,142	0,100	0,027	0,455*	0,513*	0,192	0,438*
Ставропольский край	0,732*	0,710*	0,503*	0,718*	0,821*	0,771*	0,731*	0,807*
Тамбовская	0,467*	0,385*	0,315*	0,434*	0,353*	0,238	0,132	0,226
Татарстан	0,552*	0,672*	0,613*	0,630*	0,645*	0,594*	0,543*	0,571*
Тульская	0,571*	0,599*	0,482*	0,633*	0,412*	0,333*	0,149	0,264
Удмуртия	0,122	0,293	0,251	0,438*	0,133	0,135	0,171	0,147
Ульяновская	0,171	0,321*	0,044	0,026	0,563*	0,511*	0,153	0,373*
Чувашия	0,313*	0,508*	0,189	0,261	0,577*	0,581*	0,249	0,403*
Ярославская	0,671*	0,547*	0,587*	0,546*	0,276	0,337*	0,338*	0,326*
<i>Среднее</i>	<i>0,406*</i>	<i>0,463*</i>	<i>0,337*</i>	<i>0,437*</i>	<i>0,424*</i>	<i>0,395*</i>	<i>0,240</i>	<i>0,340*</i>

* Оценки значимы при 5 %-ном уровне.

Таблица 5

Оценки адекватности регрессионных моделей для прогнозирования урожайности зерновых культур по данным за 1967—2009 гг.

Область	Озимая пшеница		Озимая рожь		Яровой ячмень		Зерновые	
	Май	Июнь	Май	Июнь	Май	Июнь	Май	Июнь
	Белгородская	0,692	0,747	0,751	0,803	0,659	0,681	0,730
Брянская	0,687	0,701	0,600	0,648	0,496	0,705	0,589	0,696
Владимирская	0,739	0,740	0,566	0,584	0,406	0,509	0,534	0,614
Волгоградская	0,721	0,793	0,747	0,878	0,657	0,853	0,749	0,856
Воронежская	0,712	0,733	0,679	0,745	0,622	0,710	0,691	0,769
Нижегородская	0,790	0,796	0,676	0,676	0,571	0,625	0,758	0,778
Ивановская	0,677	0,698	0,753	0,757	0,556	0,633	0,451	0,574
Калужская	0,730	0,754	0,790	0,839	0,597	0,767	0,688	0,801
Костромская	0,434	0,448	0,590	0,594	0,586	0,599	0,500	0,554
Краснодарский край	0,808	0,832	0,716	0,742	0,755	0,786	0,766	0,821
Самарская	0,653	0,753	0,724	0,807	0,570	0,784	0,535	0,787
Курская	0,711	0,730	0,739	0,744	0,551	0,561	0,669	0,682
Липецкая	0,736	0,740	0,752	0,792	0,715	0,789	0,798	0,826
Марий Эл	0,672	0,708	0,680	0,698	0,516	0,667	0,616	0,724
Мордовия	0,816	0,824	0,778	0,788	0,653	0,702	0,819	0,836
Московская	0,694	0,720	0,767	0,778	0,475	0,666	0,573	0,701
Оренбургская	0,617	0,693	0,642	0,739	0,590	0,818	0,579	0,803
Орловская	0,840	0,849	0,804	0,840	0,718	0,843	0,829	0,880
Пензенская	0,524	0,524	0,523	0,524	0,496	0,590	0,560	0,601

Ростовская	0,706	0,794	0,739	0,845	0,632	0,721	0,697	0,796
Рязанская	0,772	0,793	0,677	0,724	0,619	0,717	0,798	0,843
Саратовская	0,630	0,719	0,652	0,756	0,593	0,817	0,643	0,805
Ставропольский край	0,891	0,911	0,887	0,901	0,861	0,912	0,885	0,916
Тамбовская	0,665	0,690	0,560	0,630	0,493	0,614	0,604	0,681
Татарстан	0,883	0,926	0,910	0,936	0,814	0,885	0,846	0,899
Тульская	0,740	0,747	0,685	0,730	0,568	0,724	0,708	0,775
Удмуртия	0,661	0,745	0,554	0,591	0,522	0,711	0,644	0,779
Ульяновская	0,676	0,741	0,710	0,729	0,457	0,701	0,567	0,702
Чувашия	0,715	0,729	0,739	0,739	0,408	0,539	0,528	0,618
Ярославская	0,838	0,840	0,784	0,784	0,827	0,833	0,714	0,742
<i>Среднее</i>	<i>0,714</i>	<i>0,747</i>	<i>0,706</i>	<i>0,745</i>	<i>0,599</i>	<i>0,715</i>	<i>0,669</i>	<i>0,755</i>

Таблица 6

Осредненные по 30 регионам Русской равнины тренды температуры воздуха, осадков и рассчитанных влагозапасов почвы в пахотном и метровом слоях за 1967—2009 гг.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °С/10 лет	1,54	0,73	0,62	0,15	-0,12	0,07	0,36	0,22	0,14	0,55	-0,16	0,28
Осадки, мм/10 лет	3,01	4,27	3,62	0,69	2,74	4,30	1,46	1,54	3,42	2,45	0,35	0,03
W_{0-20} , мм/10 лет	—	—	1,07	0,30	0,62	0,86	0,39	0,02	0,31	0,62	—	—
W_{0-100} , мм/10 лет	—	—	3,57	1,72	2,34	2,99	2,15	0,15	0,91	1,78	—	—

Приведенные данные показывают, что тренды запасов продуктивной влаги в пахотном и метровом слоях почвы хорошо согласуются с трендами температуры воздуха и осадков. Кроме того, влияние увеличения приходной составляющей водного баланса превалирует над влиянием увеличения расходной составляющей. Таким образом, зафиксированное по данным инструментальных наблюдений потепление сопровождается ростом влагозапасов пахотного и метрового слоев почвы Центральных и Южных районов Русской равнины.

В связи с ростом влагозапасов почвы оценены климатообусловленные тренды урожайности основных зерновых культур. Проведенные расчеты показали, что тренды рассчитанной урожайности несколько выше трендов фактической урожайности. Для озимой пшеницы тренды фактической и рассчитанной урожайности составляют 1,87 и 1,92 ц/га за 10 лет, для озимой ржи — 1,63 и 1,69 ц/га за 10 лет, для ярового ячменя — 0,63 и 0,68 ц/га за 10 лет, для всех зерновых и зернобобовых в целом — 1,30 и 1,36 ц/га за 10 лет.

В заключение отметим, что разработанная численная схема впервые позволяет вести непрерывный круглогодичный мониторинг динамики запасов продуктивной влаги без необходимости задания ежегодных начальных условий для расчета влажности почвы, а кроме того, впервые позволяет оценить тренды влагозапасов почвы на основании однородных рядов за продолжительный период времени. Выявленные климатообусловленные тренды урожайности основных зерновых культур оказались положительными, что дает основание сделать вывод о благоприятном влиянии изменений климата за период 1967—2009 гг. на сельское хозяйство Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов. Показано, что учет динамики составляющих углеродного баланса наряду с учетом составляющих динамики водного баланса позволяет существенно повысить информационную значимость численного мониторинга для расчета и прогнозирования продуктивности сельского хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вериго С. А., Разумова Л. А.* (1963). Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве. — Л.: Гидрометеиздат.
- Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., Долгий-Трач В. А.* (2008). Разработка системы регионального круглогодичного мониторинга водно-теплового режима посевов сельскохозяйственных культур // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Вып. 13. С. 276—281.
- Сиротенко О. Д., Клещенко А. Д., Павлова В. Н., Абашина Е. В.* (2011). Численный мониторинг как метод исследования коэволюции климата, почв и агро-сферы на протяжении XX и XXI столетий // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Вып. 16.
- Coleman K., Jenkinson D. S.* (1996). A model for the turnover of carbon in soil. In: Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets / D. S. Powlson, P. Smith, J. U. Smith eds. NATO ASI Series I. V. 38. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, p. 237—246.

УДК 551.3+519.63

LES МОДЕЛЬ ПОЛЕЙ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ

А. А. Игнатьев

ОАО «Санкт-Петербургский научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»
191036, Санкт-Петербург, ул. 2-я Советская, дом 9/2а
E-mail: ignat2000@gmail.com

Поступила в редакцию 12.04.2011
Поступила после доработки 12.08.2011

Введение

В области пассатных ветров над океанами и над континентами в средних широтах каждого полушария находятся большие поля конвективных облаков. Их распределение в пространстве и во времени оказывает значительное влияние на погоду и климат. При моделировании климата важную роль играет параметризация глубокой конвекции с образованием полей кучевых облаков, которая определяет вертикальные потоки массы, влаги и оказывает влияние на радиационный баланс (Шнееров и др., 1997; Дымников и др., 2005).

В настоящее время хорошо изучены и используются модели облачных процессов различного уровня сложности, такие как модель частицы, модель слоя, модель Пристли (Шметер, 1972; Матвеев, 1976), различные модификации полуторамерной модели (Asai, Kasahara, 1967; Ogura, Takahashi, 1971; Shiino, 1978; Баранов и др., 1988) и струйных моделей (Бекряев, Воробьев, 1972).

Каждая из этих моделей имеет свой набор допущений. Модель частицы и модель слоя рассматривают одномерные адиабатические движения без учета вовлечения окружающего воздуха в облако. Модель Пристли и полуторамерные модели учитывают

неадиабатичность за счет введения постоянных числовых параметров, определяющих турбулентное перемешивание поднимающегося облака, что является, вообще говоря, грубым приближением реального процесса. Эти модели могут приводить к неплохим результатам в той области параметров, в которой эмпирические коэффициенты, определяющие турбулентное перемешивание, были подобраны. Однако в области параметров, заметно отличающихся от базовых, надежность результатов понижается.

Кроме того, при моделировании полей облаков такие модели либо рассматривают поле как периодическую систему одинаковых облаков (Asai, Kasahara, 1967), либо используют эмпирическую функцию распределения по размерам, но с большим набором неопределенных параметров, задаваемых из дополнительных соображений (Бекряев и др., 1979). Понятно, что такие приближения также грубы и содержат в себе большую долю неопределенности.

Более точные модели основаны на решении многомерных уравнений гидродинамики, осредненных по Рейнольдсу (RANS) либо в приближении Буссинеска, либо на основе полных уравнений Навье—Стокса (Коган и др., 1984). Турбулентность в этих уравнениях моделируется путем осреднения пульсаций всех масштабов, в результате чего в уравнения вводятся дополнительные (турбулентные) коэффициенты переноса, вычисляемые с привлечением той или иной полуэмпирической модели. Такой подход позволяет точнее, чем одномерные (или полуторамерные) модели, воспроизводить турбулентные процессы как в одиночном облаке, так и в поле облаков. Осреднение пульсаций всех масштабов в рамках RANS модели и использование известной гипотезы Буссинеска приводят к тому, что турбулентные потоки моделируются в виде закона Фурье:

$$\overline{\varphi' u_i'} = K \frac{\partial \varphi}{\partial x_i},$$

где ϕ' и u'_i — турбулентные пульсации переносимой величины и скорости в координатном направлении x_i , K — коэффициент турбулентного переноса. Черта сверху означает осреднение.

Очевидно, что вся ответственность за реалистичность описания турбулентного переноса лежит, во-первых, на правомочности использования гипотезы Буссинеска и, во-вторых, на коэффициенте K , вычисляемом с помощью турбулентной модели, точность которой (в силу ее полуэмпиричности) принципиально ограничена.

Этот недостаток во многом может быть преодолен в подходе, известном как модель больших вихрей (large eddy simulation, LES), впервые предложенном Смагоринским (Smagorinsky, 1963) и позднее развитом в работе Дирдорфа (Deardorff, 1970). В настоящее время LES широко применяется как для моделирования атмосферных процессов (Sommeria, 1976; Sommeria, LeMone, 1978; Nicholls et al., 1982), так и в других областях и позволяет получать результаты, недоступные в рамках классического RANS подхода. Идея метода проста и состоит в том, что осреднение турбулентных пульсаций осуществляется не на всех масштабах, а только на интервале масштабов, начиная от размера порядка сеточной ячейки до самого маленького (колмагоровского масштаба).

Такой процесс фильтрации мелкомасштабных пульсаций приводит к тому, что турбулентные потоки моделируются в виде суммы двух составляющих:

$$\overline{\phi' u'_i} = (\overline{\phi' u'_i})_{\text{resolved}} + K_{\text{subgrid}} \frac{\partial \phi}{\partial x_i},$$

где первое слагаемое в правой части представляет собой турбулентный поток, явно разрешаемый на сетке без осреднения (resolved), а второе — подсеточный (subgrid) поток, осредненный на масштабах, меньших характерного размера ячейки. При этом подсеточный коэффициент турбулентного переноса K_{subgrid} пара-

метризуется с помощью полуэмпирической модели турбулентности аналогично RANS подходу с тем отличием, что он зависит теперь от размера ячейки Δ таким образом, что $K_{\text{subgrid}} \rightarrow 0$ при $\Delta \rightarrow 0$. Этот факт является преимуществом LES модели, так как турбулентные пульсации малых масштабов более изотропны и поэтому точнее параметризуются. Заметим также, что LES моделирование возможно только в трехмерной постановке, так как разрешаемые пульсации, отражающие реальные, всегда трехмерны.

Таким образом, с уменьшением размера ячейки расчетной сетки при использовании LES метода доля ответственности подсеточной модели за точность моделирования турбулентных потоков уменьшается и становится пренебрежимо малой, если сеточный размер становится порядка колмогоровского. В этом случае турбулентные пульсации всех масштабов моделируются напрямую (direct numerical simulation, DNS), без привлечения какой-либо полуэмпирической параметризации. Именно такой подход является самым точным, но, к сожалению, современные вычислительные средства позволяют применять DNS только для невысоких значений числа Рейнльда (до 2000—3000). В интересующих нас атмосферных процессах число Рейнольдса существенно выше, а характерный колмогоровский масштаб имеет величину порядка миллиметра, так что использовать такую мелкую сетку для расчета облачных полей, очевидно, не представляется возможным на современном уровне развития вычислительной техники.

LES моделирование является компромиссом между полным осреднением (RANS) и прямым численным моделированием турбулентных пульсаций всех масштабов (DNS) и позволяет успешно моделировать напрямую крупные вихри. А поскольку основная часть энергии турбулентных пульсаций лежит именно в крупномасштабной части спектра, использование LES моделей позволяет получить более реалистичную и точную картину турбулентного обмена, так как именно крупные вихри, явно разрешаемые во времени, определяют форму, размер облаков и их взаимодействие с окружающей атмосферой.

Основная цель данной работы состоит в описании математической модели полей облаков на основе LES методологии (Cuijpers, Duynkerke, 1993; Nieuwstadt, Brost, 1986) и проверке точности вычислительного алгоритма на основе задачи распада вихря. В дальнейшем предполагается проверка точности алгоритма на основе данных наблюдений уже реальных полей облаков, имеющихся в литературе, а также проведение более детального численного исследования, включающего следующие вопросы: 1) определение эффективной турбулентной вязкости на основе LES данных в облачном и подоблачном слое; 2) определение функции распределения облаков по размерам и проверку гипотезы степенного закона с масштабным изломом (Neggers и др., 2003); 3) определение чувствительности численных результатов к вычислительным параметрам, таким как горизонтальный размер моделируемой области и размер ячейки.

1. Основные уравнения

Как отмечалось выше, в LES моделировании большие (разрешенные) масштабы движения рассчитываются явно, в то время как маленькие (подсеточные) масштабы параметризуются (Nieuwstadt, Brost, 1986). До высот порядка 3 км движение атмосферы, состоящей из воздуха, водяного пара и облачных капель, можно считать удовлетворяющим уравнениям Навье—Стокса для несжимаемого течения в приближении Буссинеска во вращающейся системе координат.

Уравнения, описывающие движение жидкости, подвергаются операции фильтрации для разделения разрешаемого и подсеточного масштабов. Фильтрация представляет собой некоторую процедуру осреднения в пределах некоторой небольшой окрестности точки течения. Характерный размер этой окрестности представляет собой размер фильтра, который обычно пропорционален размеру ячейки расчетной сетки.

В соответствии с этим каждый параметр (скорость, давление, температура, влагосодержание) мы представляем в виде суммы средней и пульсационной составляющей: $f = \bar{f} + f'$. Применяв операцию фильтрации, получим следующую систему основных уравнений в приближении Буссинеска, записанных с учетом сил Кориолиса в декартовых координатах (Deardorff, 1980):

уравнение импульса

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j - \tau_{ij}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} E \right) - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j \bar{u}_k + g \frac{\bar{\theta}_v - \theta_0}{\theta_0} \delta_{i3}, \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

уравнение сохранения температуры $\bar{\theta}_l$

$$\frac{\partial \bar{\theta}_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\theta}_l \bar{u}_j + \overline{\theta'_l u'_j}) = -\frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial F}{\partial x_3}, \quad (3)$$

уравнение сохранения полного влагосодержания \bar{q}_t

$$\frac{\partial \bar{q}_t}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{q}_t \bar{u}_j + \overline{q'_t u'_j}) = 0, \quad (4)$$

где x_j — координата в направлении j ($j = 1, 2$ — горизонтальные направления, $j = 3$ — вертикальное), \bar{u}_i — компоненты скорости ($i = 1, 2, 3$), \bar{p} — давление (для третьей компоненты импульса за вычетом гидростатической части), ρ — постоянная плотность среды, Ω_i — компоненты вектора угловой скорости вращения Земли в выбранной системе координат, g — ускорение свободного падения, $\bar{q}_t = \bar{q}_v + \bar{q}_l$ — полное влагосодержание, \bar{q}_v и \bar{q}_l — массо-

вые концентрации водяного пара и облачных капель соответственно, F — уходящий радиационный поток, c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, ε_{ijk} — тензор перестановок, δ_{ij} — символ Кронекера.

Потенциальная температура с учетом жидкой влаги $\bar{\theta}_l$ (liquid water potential temperature) в рассматриваемой постановке сохраняется при фазовом переходе и определяется следующим образом (Betts, 1973):

$$\bar{\theta}_l = \bar{\theta} - \left(\frac{L\bar{\theta}}{c_p\bar{T}} \right) \bar{q}_l, \quad (5)$$

где L — удельная теплота фазового перехода, \bar{T} — абсолютная температура, $\bar{\theta}$ — потенциальная температура, $\bar{\theta}_v = \bar{\theta}(1 + 0,61\bar{q}_v - \bar{q}_l)$ — виртуальная потенциальная температура; θ_0 — некоторая фоновая постоянная потенциальная температура.

Кинетическая энергия подсеточных турбулентных пульсаций описывается формулой

$$E = \frac{1}{2} \left(\overline{(u'_1)^2} + \overline{(u'_2)^2} + \overline{(u'_3)^2} \right).$$

Компоненты тензора подсеточных турбулентных напряжений τ_{ij} имеют вид

$$\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} + \frac{2}{3} E \delta_{ij},$$

где δ_{ij} — символ Кронекера.

Уравнения импульса (1) можно переписать в виде

$$\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_1 \bar{u}_j - \tau_{1j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\bar{p}^* + \frac{2}{3} E \right) + f_c (\bar{u}_2 - U_{2g}), \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_2 \bar{u}_j - \tau_{2j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\bar{p}^* + \frac{2}{3} E \right) - f_c (\bar{u}_1 - U_{1g}), \quad (6б)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_3 \bar{u}_j - \tau_{3j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\bar{p}^* + \frac{2}{3} E \right) + g \frac{\bar{\theta}_v - \theta_0}{\theta_0}, \quad (6в)$$

где $\bar{p}^* = \bar{p} - \bar{p}_0$ — динамическое давление ($\bar{p}_0 = \bar{p}_0(z)$ — гидростатическая часть), $f_c = 2\Omega \sin \varphi$ — параметр Кориолиса (φ — широта, Ω — угловая скорость вращения Земли), U_{1g} и U_{2g} — компоненты геострофического ветра.

Таким образом, уравнения (6) совместно с уравнениями (2)–(4) представляют собой окончательную систему уравнений, описывающих движение облаков.

2. Подсеточная модель

Подсеточные потоки импульса τ_{ij} , тепла $\overline{\theta'_i u'_i}$ и полного влагосодержания $\overline{q'_i u'_i}$ должны быть параметризованы с помощью турбулентной модели. Мы предполагаем, что они могут быть представлены в виде произведения коэффициента вихревой вязкости K и локального градиента скорости, температуры и полного влагосодержания соответственно:

$$\tau_{ij} = K_m \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad \overline{\theta'_i u'_i} = -K_h \frac{\partial \bar{\theta}_i}{\partial x_i}, \quad \overline{q'_i u'_i} = -K_q \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial x_i}.$$

Коэффициенты вихревой вязкости K_m , K_h и K_q являются функциями подсеточной турбулентной энергии E и подсеточного масштаба. Для определения величины E мы используем дополнительное дифференциальное уравнение вида (Deardorff, 1980; Cuijpers, Duynkerke, 1993)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E^{1/2}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial E^{1/2}}{\partial x_j} = \\ & = \frac{1}{2E^{1/2}} \left\{ \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{g}{\theta_0} \overline{u'_3 \theta'_v} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ 2K_m \frac{\partial E^{1/2}}{\partial x_j} \right\} - \frac{\varepsilon}{2E^{1/2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Первые два члена в правой части (7) описывают производство подсеточной турбулентности за счет сдвига и плавучести. Третий член описывает диффузный перенос и четвертый — вязкую диссипацию. Член плавучести $\theta_0^{-1} g \overline{u'_3 \theta'_v}$ выражается через неизвестные нашей системы $\bar{\theta}_l$ и \bar{q}_t следующим образом (Cuijpers, Duynkerke, 1993):

$$\overline{u'_3 \theta'_v} = A \overline{u'_3 \theta'_l} + B \bar{\theta} \overline{u'_3 q'_t}.$$

Для ненасыщенного воздуха $A = 1 + 0,61\bar{q}_t$ и $B = 0,61$.

Для насыщенного воздуха

$$A = \frac{1 - \bar{q}_t + 1,61\bar{q}_s \left(1 + 0,622 \frac{L}{R_a \bar{T}} \right)}{1 + 0,622 \frac{L^2}{R_a c_p \bar{T}^2} \bar{q}_s}, \quad B = \frac{L}{\bar{T} c_p} A - 1,$$

где R_a — газовая постоянная для сухого воздуха. \bar{q}_s — удельная влажность на линии насыщения при данной температуре.

Скорость подсеточной диссипации ε определяется следующим выражением (Cuijpers, Duynkerke, 1993; Schmidt, Schumann, 1989):

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\left(\frac{3}{2}\alpha\right)^{3/2}} \frac{E^{3/2}}{\lambda_c}. \quad (8)$$

Параметр λ_c (подсеточный масштаб) для неустойчивой конвекции выбирается пропорциональным размеру ячейки

$\Delta = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{1/3}$, где Δx_i — размер ячейки сетки в i -м координатном направлении и $\alpha = 1,5$ — константа Колмогорова. В работе Cuijpers (1990) используется выбор $\lambda_c = 2,5\Delta$.

Коэффициенты вихревой вязкости рассчитываются по формулам (Cuijpers, Duynkerke, 1993)

$$K_m = \frac{\lambda_c E^{1/2}}{2\pi \left(\frac{3}{2}\alpha\right)^{3/2}}, \quad K_h = K_q = 3K_m.$$

3. Граничные условия на поверхности и устойчивый слой

В непосредственной близости от поверхности вертикальные профили температуры, влажности и скорости имеют большие градиенты. На разностной сетке с характерным размером ячейки в несколько десятков метров такие градиенты не могут быть достаточно точно аппроксимированы, и поэтому для корректного описания граничных условий на поверхности требуется параметризация поверхностных потоков импульса, тепла и влаги. С этой целью может быть использована теория подобия Мони́на—Обухова, в соответствии с которой градиенты параметров у поверхности могут быть записаны в виде следующих безразмерных соотношений:

$$\frac{\phi_m}{k} = \frac{z}{u_*} \frac{\partial |u_h|}{\partial z}, \quad \frac{\phi_h}{k} = \frac{z}{\theta_*} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}, \quad \frac{\phi_q}{k} = \frac{z}{q_*} \frac{\partial \bar{q}_t}{\partial z}, \quad (9)$$

где u_h — горизонтальная скорость; z — вертикальная ось; $u_* = \sqrt{|\tau_w|}$ — масштаб скорости (динамическая скорость); θ_* , q_* — масштабы температуры и влагосодержания; τ_w — кинематическое напряжение трения на поверхности; $k = 0,35$ — постоянная

Кармана; ϕ_m , ϕ_h , ϕ_q — универсальные эмпирические функции (Jacobson, 2005):

$$\phi_m(z) = \begin{cases} 1 + \beta_m \frac{z}{L_{\text{МО}}}, & \frac{z}{L_{\text{МО}}} > 0, \text{ устойчивый слой,} \\ \left(1 - \gamma_m \frac{z}{L_{\text{МО}}}\right)^{-1/4}, & \frac{z}{L_{\text{МО}}} < 0, \text{ неустойчивый слой,} \\ 1, & \frac{z}{L_{\text{МО}}} = 0, \text{ нейтральный слой,} \end{cases}$$

$$\phi_h(z) = \phi_q(z) = \begin{cases} \text{Pr}_t + \beta_h \frac{z}{L_{\text{МО}}}, & \frac{z}{L_{\text{МО}}} > 0, \text{ устойчивый слой,} \\ \text{Pr}_t \left(1 - \gamma_h \frac{z}{L_{\text{МО}}}\right)^{-1/2}, & \frac{z}{L_{\text{МО}}} < 0, \text{ неустойчивый слой,} \\ \text{Pr}_t, & \frac{z}{L_{\text{МО}}} = 0, \text{ нейтральный слой,} \end{cases}$$

где $\beta_m = 4,7$; $\gamma_m = 15$; $\beta_h = 4,7$; $\gamma_h = 9$; $\text{Pr}_t = K_m / K_h$ — турбулентное число Прандтля ($\sim 0,74$); $L_{\text{МО}}$ — длина Монина—Обухова:

$$L_{\text{МО}} = -\frac{u_*^3 \theta_v}{kg(\overline{u'_3 \theta'_v})_w} = \frac{u_*^2 \overline{\theta}_v}{kg\theta_*},$$

где $(\overline{u'_3 \theta'_v})_w = -u_* \theta_*$ — кинематический виртуальный тепловой поток (направленный в жидкость, если $(\overline{u'_3 \theta'_v})_w > 0$). Проинтегрировав обе стороны соотношений (9) между z_0 и z , получаем (Jacobson, 2005):

$$|\overline{u}_h(z)| = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_{0,m}} \right) - \psi_m \right], \quad (10a)$$

$$\bar{\theta}_v(z) = \bar{\theta}_v(z_{0,h}) + \text{Pr}_t \frac{\theta_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_{0,h}} \right) - \psi_h \right], \quad (10б)$$

$$\bar{q}_t(z) = \bar{q}_t(z_{0,v}) + \text{Pr}_t \frac{q_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_{0,v}} \right) - \psi_h \right], \quad (10в)$$

где $z_{0,m}$, $z_{0,h}$, $z_{0,v}$ — высота аэродинамической шероховатости для импульса, тепла и влаги соответственно;

$$\psi_m = \begin{cases} -\frac{\beta_m}{L_{MO}}(z - z_{0,m}), & \frac{z}{L_{MO}} > 0, \text{ устойчивый слой,} \\ \ln \frac{[1 + \phi_m(z)^{-2}][1 + \phi_m(z)^{-1}]^2}{[1 + \phi_m(z_{0,m})^{-2}][1 + \phi_m(z_{0,m})^{-1}]^2} - & \frac{z}{L_{MO}} < 0, \text{ неустойчивый слой,} \\ -2\text{arctg}[\phi_m(z)^{-1}] + 2\text{arctg}[\phi_m(z_{0,m})^{-1}]^{-1}, & \\ 0 & \frac{z}{L_{MO}} = 0, \text{ нейтральный слой,} \end{cases}$$

$$\psi_h = \begin{cases} -\frac{1}{\text{Pr}_t} \frac{\beta_h}{L_{MO}}(z - z_{0,h}), & \frac{z}{L_{MO}} > 0, \text{ устойчивый слой,} \\ 2 \ln \frac{1 + \phi_h(z)^{-1}}{1 + \phi_h(z_{0,h})^{-1}}, & \frac{z}{L_{MO}} < 0, \text{ неустойчивый слой,} \\ 0 & \frac{z}{L_{MO}} = 0, \text{ нейтральный слой.} \end{cases}$$

Зная значения горизонтальной скорости, потенциальной виртуальной температуры и полного влагосодержания в ближайшей к поверхности ячейке, $|\bar{u}_h(z)|$, $\bar{\theta}_v(z)$ и $\bar{q}_t(z)$, а также температуру поверхности $\bar{\theta}_v(z_{0,h})$ и полное влагосодержание на поверхности $\bar{q}_t(z_{0,h})$, из соотношений (10) находим соответствующие масштабы u_* , θ_* , q_* и соответствующие им потоки импульса, тепла и влаги на поверхности, используемые уже как граничные условия:

$$\tau_w = \sqrt{(\overline{u'_z u'_x})_w^2 + (\overline{u'_z u'_y})_w^2} = u_*^2; \quad (\overline{u'_z \theta'_v})_w = -u_* \theta_*; \quad (\overline{u'_z q'_t})_w = -u_* q_*.$$

Кроме того, подсеточный масштаб λ_c уменьшается с приближением к поверхности в силу того, что турбулентные вихри становятся более мелкими. Для учета этого эффекта в выражение для скорости диссипации (8) мы вводим поправочный коэффициент f (Schmidt, Schumann, 1989):

$$\varepsilon = \frac{2\pi E^{3/2}}{\left(\frac{3}{2}\alpha\right)^{3/2} \lambda_c} f, \quad f = \max(1, \Delta/z).$$

Выше пограничного слоя имеет место устойчивая температурная стратификация. При этом подсеточная длина становится очень маленькой, λ_c и коэффициенты вихревой вязкости уже больше не будут пропорциональны размеру ячейки в этой области, поэтому подсеточный масштаб здесь выбирается пропорциональным минимальной величине между Δ и $0,5E^{1/2}/\omega_B$, где величина

$$\omega_B = \left(\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z} \right)^{1/2}$$

представляет собой частоту Брента—Вайсала. При этом турбулентность подавляется тем сильнее, чем выше устойчивость, и окончательно исчезает, когда градиентное число Ричардсона

$$\text{Ri} = \frac{\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}}{\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2}$$

превышает критическое значение $\text{Ri}_{\text{кр}} = 0,27$.

4. Конденсационная схема

При численном расчете развития облаков мы полагаем, что в каждой расчетной ячейке паровоздушная среда может достигать насыщения, а избыток влаги, если таковой имеется, мгновенно конденсируется, образуя облачные капли \bar{q}_l . И, наоборот, если насыщение не достигается, то вся жидкая влага \bar{q}_l , если таковая имелаась в данной ячейке, мгновенно испаряется. Для описания этих процессов с учетом теплоты фазового перехода мы используем следующую конденсационную схему, в соответствии с которой рассчитывается доля облачных капель \bar{q}_l по известному значению θ_l на данной высоте (Sommeria, Deardorff, 1977).

Сначала в каждой ячейке рассчитываем так называемую абсолютную температуру с учетом жидкой влаги:

$$\bar{T}_l = \bar{T} - \frac{L}{c_p} \bar{q}_l = \left(\frac{p_{ref}}{p(0)} \right)^{R_a/c_p} \bar{\theta}_l. \quad (11)$$

Здесь $p(0)$ — давление при $z = 0$ (10^5 Па) и

$$p_{ref} = p(0) \left(\frac{T_{ref}(z)}{T_{ref}(0)} \right)^{c_p/R_a},$$

где $T_{ref}(z) = T_{ref}(0) - (g/c_p)z$. Далее рассчитывается массовая доля водяного пара на линии насыщения при температуре \bar{T}_l :

$$q_{sl} = q_s(\bar{T}_l, p) = 0,622e_s(\bar{T}_l)/(p_{ref} - 0,378e_s(\bar{T}_l)).$$

Массовую долю водяного пара на линии насыщения при температуре \bar{T} запишем приближенно в виде первых двух членов ряда Тейлора:

$$q_s(\bar{T}, p) \approx q_{sl} + \left(\frac{\partial q_s}{\partial T} \right)_{T=T_l} (\bar{T} - \bar{T}_l). \quad (12)$$

Как отмечается в работе Sommeria, Deardorff (1977), разность $\bar{T} - \bar{T}_l$ не превышает 0,02К, так что соотношение (12) выполняется с высокой точностью.

Используя соотношение Клаузиса—Клапейрона в виде

$$\left(\frac{\partial q_s}{\partial T} \right)_{T=T_l} = \frac{0,622Lq_{sl}}{R_a \bar{T}_l^2},$$

получим окончательное выражение для массовой доли водяного пара на линии насыщения:

$$q_s = q_s(\bar{T}, p) = q_{sl}(1 + \beta_1 \bar{q}_t) / (1 + \beta_1 q_{sl}),$$

где $\beta_1 = 0,622 \frac{L^2}{R_a c_p \bar{T}_l^2}$.

Состояние насыщения имеет место при выполнении неравенства

$$\bar{q}_l = \bar{q}_t - \bar{q}_s \geq 0.$$

Если $\bar{q}_t \leq q_s$, то мы полагаем $\bar{q}_l = 0$, $\bar{\theta} = \bar{\theta}_l$ и $\bar{T} = \bar{T}_l$. В противном случае $\bar{q}_l = \bar{q}_t - \bar{q}_s$, а \bar{T}_l вычисляется по соотношению (11).

5. Численный алгоритм

Выбор численного метода, применяемого для решения уравнений в рамках LES метода, ограничен двумя важными требованиями. Во-первых, разностная аппроксимация конвективных членов уравнений импульса должна обеспечивать сохранение кинетической энергии с достаточной точностью, и, во-вторых,

численная схема должна быть недиссипативной (Morinishi et al., 1998). С этой целью обычно применяют смещенные (staggered) сетки с аппроксимацией конвективных членов 2-го порядка точности, предложенные в работе Piacsek, Williams (1970). Давление, температура, скаляры и коэффициенты переноса ассоциированы с центрами ячеек, а компоненты скорости — с их гранями. Для сохранения кинетической энергии с высокой точностью интегрирование по времени осуществлялось с помощью явной схемы Адамса—Башфорта 4-го порядка точности (Шуп, 1982).

Для обеспечения условия неразрывности использовался метод, предложенный в работе Kim, Moin (1985). На определенном этапе этот метод приводит к необходимости решения уравнения Пуассона для давления

$$\Delta \bar{p}^* = \frac{1}{\Delta t} \operatorname{div}(\mathbf{u}^*),$$

где \mathbf{u}^* — промежуточная скорость, полученная предварительно путем решения уравнения импульса при $\bar{p}^* = 0$.

После того как уравнение Пуассона решено и давление \bar{p}^* найдено, рассчитывается поле скорости в новом временном слое, которое уже удовлетворяет условию неразрывности:

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* - \Delta t \operatorname{grad} \bar{p}^*.$$

Для решения уравнения Пуассона мы применяем параллельный метод бистабиллизированных сопряженных градиентов (BCGSTAB) (Saad, 2003; Игнатъев, Затевахин, 2009). Для решения уравнений переноса скаляров (3) и (4) используется квазимонотонная WENO версия схемы Ботта 5-го порядка точности, гарантирующая положительность решения (Игнатъев, 2008).

6. Проверка точности численного алгоритма

Точность численного метода была проверена на задаче прямого моделирования распада трехмерного вихря Тейлора—Грина (Green, Taylor, 1937). Это простейшее нелинейное трехмерное несжимаемое течение, используемое обычно для проверки LES моделей. Рассматривался изотермический процесс в отсутствие влаги. Подсеточная параметризация была выключена. Кинематический коэффициент вязкости K_m полагался равным $1/Re$, где число Рейнольдса $Re = 200$. Расчетная область представляла собой куб с размерами $2\pi \times 2\pi \times 2\pi$ и периодическими граничными условиями на всех границах. Начальные условия, удовлетворяющие уравнению неразрывности, имели следующий вид (начало системы координат $(0, 0, \pi/2)$):

$$u_x(x, y, z) = \cos(x) \sin(y) \cos(z),$$

$$u_y(x, y, z) = -\sin(x) \cos(y) \cos(z),$$

$$u_z(x, y, z) = 0.$$

Был проведен расчет для безразмерного времени $t = 10$ на сетке, состоящей из $32 \times 32 \times 32$ ячеек. На рис. 1 *a* показано последовательное развитие течения в процессе распада вихря (изоповерхность абсолютного значения скорости $|u| = 0,5$). Нелинейные конвективные члены уравнения импульса вызывают растяжение и изгиб вихря с возрастанием среднеквадратичной завихренности, что приводит к каскадной передаче энергии турбулентных пульсаций от больших масштабов к меньшим. С течением времени молекулярная диффузия снижает и среднеквадратичную завихренность, и кинетическую энергию.

Численные результаты сравнивались с аналитической аппроксимацией Тейлора—Грина для эволюции среднеквадратичной завихренности (Green, Taylor, 1937):

$$\overline{\Omega^2}(t) = \frac{3}{4} \left[1 - \frac{6t}{\text{Re}} + \left(\frac{5}{48} + \frac{18}{\text{Re}^2} \right) t^2 - \left(\frac{5}{3} + \frac{36}{\text{Re}^2} \right) \frac{t^3}{\text{Re}} + \dots \right],$$

где среднеквадратичная завихренность определяется следующим образом:

$$\overline{\Omega^2}(t) = \frac{1}{8\pi^3} \int_{|0,2\pi|^3} \omega^2(t) dV, \quad \omega = \text{rot} \mathbf{u}.$$

Аналитическая аппроксимация имеет достаточно высокую точность для начального периода $t < 3 \dots 4$ и хорошо совпадает с численным решением на этом интервале (рис. 1 б).

Заключение

Предложена математическая LES модель полей пассатных облаков, включающая в себя процессы турбулентного движения пограничного слоя атмосферы на основе модели больших вихрей. Модель включает в себя также процессы переноса, выражающие законы сохранения полного влагосодержания и потенциальной температуры с учетом жидкой влаги, а также процессы равновесной конденсации и испарения облачных капель. Учтена параметризация граничных условий на подстилающей поверхности на основе теории Монина—Обухова. Разработаны численный алгоритм и компьютерная программа. В качестве тестовой задачи рассмотрен распад большого вихря, процессы в котором аналогичны турбулентным процессам в пограничном слое атмосферы. Показано хорошее совпадение численного и аналитического решений для эволюции среднеквадратичной завихренности, что подтверждает точность численной модели, достаточной для LES моделирования.

В дальнейшем предполагаются проверка точности алгоритма на основе данных наблюдений уже реальных полей облаков,

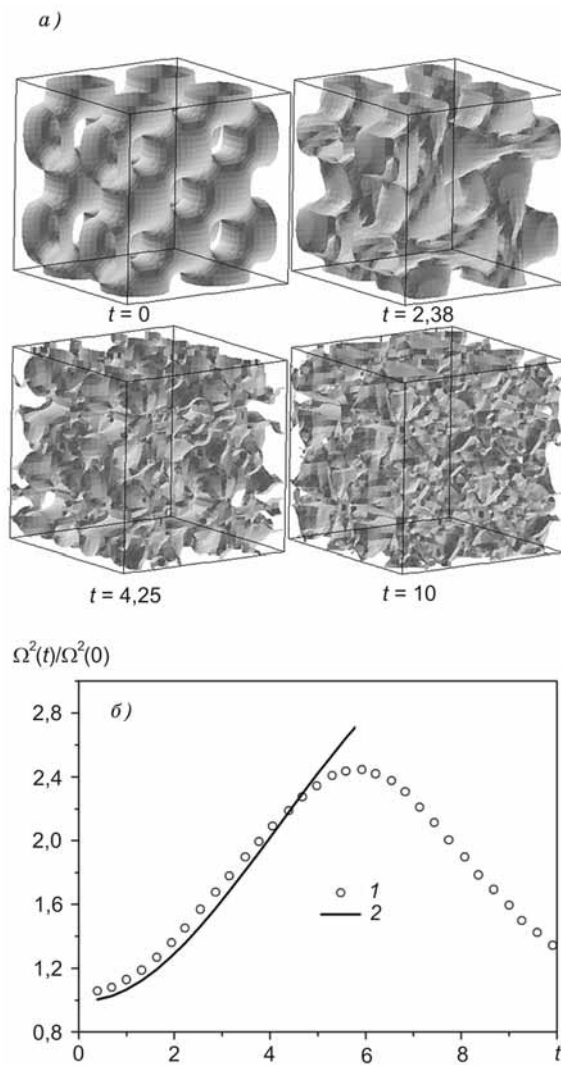


Рис. 1. Эволюция изоповерхности модуля скорости ($u = 0,5$) в процессе распада вихря Тейлора—Грина (a) и сравнение численного (1) и аналитического (2) решений (б).

имеющихся в литературе, а также проведение более детального численного исследования, включающего следующие вопросы: 1) определение эффективной турбулентной вязкости на основе LES данных в облачном и подоблачном слоях; 2) определение функции распределения облаков по размерам и проверку гипотезы степенного закона с масштабным изломом (Neggers и др., 2003); 3) определение чувствительности численных результатов к вычислительным параметрам, таким как горизонтальный размер моделируемой области и размер ячейки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баранов В. Г., Довгалюк Ю. А., Станкова Е. Н. (1988). Полуторамерная модель естественной эволюции конвективного облака и воздействий на него / В сб.: Математическое моделирование атмосферной конвекции и искусственных воздействий на конвективные облака. — М.: Гидрометеиздат. 187 с.

Бекряев В. И., Воробьев Б. М. (1972). Струйная модель облачной конвекции. Численный эксперимент // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 8, № 9. С. 925—933.

Бекряев В. И., Довгалюк Ю. А., Зинченко А. В. (1979). Определение некоторых свойств ансамбля конвективных облаков по данным аэрологического зондирования // Труды ГГО. Вып. 405. С. 3—9.

Дымников В. П., Лыкосов В. Н., Володин Е. М., Галин В. Я., Глазунов А. В., Грицун А. С., Даинский Н. А., Толстых М. А., Чавро А. И. (2005). Моделирование климата и его изменений / В сб.: Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т. 2. Математическое моделирование. — М.: Наука. 405 с.

Игнатьев А. А. (2008). ENO и WENO версии схемы Ботта для уравнения переноса // Математическое моделирование. № 10. С. 86—98.

Игнатьев А. А., Затевахин М. А. (2009). Параллельный метод для решения уравнения Пуассона / Параллельные вычислительные технологии (ПавТ'2009). Труды международной научной конференции (Нижний Новгород, 30 марта — 3 апреля 2009 г.). — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, с. 491—495.

Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И. (1984). Численное моделирование облаков. — М.: Гидрометеиздат. 183 с.

Матвеев Л. Т. (1976). Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 639 с.

- Мазин И. П., Шметер С. М. (1982).* Облака. Строение и физика образования. — Л.: Гидрометеоиздат. 297 с.
- Мейсон Б. Д. (1961).* Физика облаков. — Л.: Гидрометеоиздат. 542 с.
- Шметер С. М. (1972).* Физика конвективных облаков. — Л.: Гидрометеоиздат. 231 с.
- Шнееров Б. Е., Мелешко В. П., Соколов А. П., Шейнин Д. А., Любанская В. А., Спорышев П. В., Матюгин В. А., Катцов В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В. (1997).* Глобальная модель общей циркуляции атмосферы и верхнего слоя океана // Труды ГГО. Вып. 544. С. 3—123.
- Шишкин Н. С. (1964).* Облака, осадки и грозовое электричество. — Л.: Гидрометеоиздат. 401 с.
- Шун Т. (1982).* Решение инженерных задач на ЭВМ. — М.: Мир, с. 235.
- Asai T., Kasahara A. (1967).* A theoretical study of the compensating downward motions associated with cumulus clouds // *J. Atm. Sci.* V. 24. P. 487—496.
- Betts, A. K. (1973).* Non-precipitating cumulus convection and its parametrization // *Quart. J. Roy. Soc.* V. 99. P. 178—196.
- Cuijpers, J. W. M., Duynkerke, P. G. (1993).* Large eddy simulation of trade cumulus clouds // *J. Atmos. Sci.* V. 50. P. 3894—3908.
- Cuijpers, J. W. M. (1990).* Subgrid parametrization in large-eddy simulation model // Ninth Symp. on Turbulence and Diffusion, Roskilde, Denmark, Amer. Meteor. Soc., p. 176—179.
- Deardorff, J. W. (1970).* A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers // *J. Fluid Mech.* V. 41, № 2. P. 453—480.
- Deardorff, J. W. (1980).* Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model // *Boundary-Layer Meteor.* V. 18. P. 495—527.
- Green, A. E., Taylor G. I. (1937).* Mechanism of the production of small eddies from large ones // *Proc. Royal Soc. Ser. A.* V. 158. P. 499—521.
- Jacobson, M. Z. (2005).* Fundamentals of atmospheric modeling. — Cambridge University Press. New York, p. 813.
- Kim, J., Moin, P. (1985).* Application of fractional-step method to incompressible Navier—Stokes equations // *J. Comp. Phys.* V. 59. P. 308—323.
- Morinishi, Y., Lund, T. S., Vasilyev, O. V., Moin, P. (1998).* Fully conservative higher order finite difference schemes for incompressible flow // *J. Comp. Phys.* V. 143. P. 90—124.
- Neggers, R. F. J., Jonker, H. J. J., Siebesma, A. P. (2003).* Size statistics of cumulus cloud populations in large-eddy simulation // *J. Atmos. Sci.* V. 60. P. 1060—1074.

Nicholls, S., LeMone, M. A., Sommeria, G. (1982). The simulation of a fair weather marine boundary layer in GATE using a three-dimensional model // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* V. 108. P. 167—190.

Nieuwstadt, F. T. M., Brost, R. A. (1986). The decay of convective turbulence // *J. Atmos. Sci.* V. 43. P. 532—546.

Ogura Y., Takahashi T. (1971). Numerical simulation of the life cycle of a thunderstorm cell // *Mon. Wea. Rev.* V. 99, № 12. P. 895—911.

Piacsek, S. A., Williams, G. P. (1970). Conservation properties of convection difference schemes // *J. Comp. Phys.* V. 6. P. 392—405.

Saad, Y. (2003). Iterative methods for sparse linear systems. — SIAM, 2d edition, Philadelphia, PA.

Schmidt, H., Schumann, U. (1989). Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations // *J. Fluid Mech.* 1989. V. 200. P. 511—562.

Shiino J. (1978). A numerical study of precipitation development in cumulus clouds // *Pap. Met. Geophys.* V. 29, № 4. P. 157—194.

Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations // *Mon. Wea. Rev.* V. 91, № 3. P. 99—164.

Sommeria, G., LeMone M. A. (1978). Direct testing of a three-dimensional model of the planetary boundary layer against experimental data // *J. Atmos. Sci.* V. 35. P. 25—39.

Sommeria, G. (1976). Three-dimensional simulation of turbulent processes in an undisturbed trade wind boundary layer // *J. Atmos. Sci.* V. 33. P. 216—241.

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

УДК 551.3+519.63

К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ LES МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕЙ КУЧЕВЫХ ОБЛАКОВ

Ю. А. Довгалюк¹, А. А. Игнатьев²

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

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

² ОАО «Санкт-Петербургский научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»
191036, Санкт-Петербург, ул. 2-я Советская, дом 9/2а
E-mail: ignat2000@gmail.com

Поступила в редакцию 06.09.2011

Введение

К числу ключевых факторов изменения климата относятся облачные поля, в частности поля (ансамбли, скопления) конвективных облаков разной горизонтальной и вертикальной протяженности, оказывающие существенное влияние на перераспределение суммарного притока тепла и влаги в атмосфере (Облака и облачная атмосфера, 1989; Шнееров и др., 1997). Примерами таких ансамблей являются поля внутримассовых конвективных облаков, гряды фронтальных конвективных облаков, поля конвективных облаков зон сходимости воздушных потоков, поля пассатных кучевых облаков (Амитина, Довгалюк, 1979; Бекряев и др., 1979). Для исследования характеристик полей облаков ранее использовался метод слоя (Шишкин, 1964; Довгалюк, Ивлев, 1998), который прост, но имеет тот недостаток, что не учитывает неадиабатичность конвекции, связанной с турбулентным перемешиванием. Современные численные методы, такие как LES моделирование, которые успешно используются для исследования атмосферных процессов уже на протяжении ряда лет, позволяют

учитывать эти процессы без привлечения полуэмпирической параметризации. Поэтому можно надеяться, что разработка таких численных моделей полей конвективных облаков поможет точнее исследовать вклад облачности в процессы формирования и изменения погоды, а также будет способствовать совершенствованию глобальных моделей общей циркуляции атмосферы (Шнееров и др., 1997), что определяет актуальность данного направления исследования.

Известно, что влияние облачности на климат обусловлено широким спектром явлений, включающим взаимодействие между динамическими, гидротермодинамическими и радиационными процессами, преобразование радиации в кинетическую энергию турбулентных потоков тепла и влаги у подстилающей поверхности, изменение отношения коротковолновой радиации к длинноволновой в системе атмосфера—океан и др. В настоящей работе авторы ограничились рассмотрением только некоторых из них — тех, которые обусловлены турбулентной структурой облачного и подоблачного слоев и ее влиянием на скорость вовлечения в облако окружающего воздуха, мощность и другие характеристики кучевых облаков, образующих поля небольшой вертикальной протяженности.

Турбулентная структура течений в подоблачном и облачном слоях является предметом экспериментальных и теоретических исследований в течение многих лет (LeMone and Zipser, 1980; Lucas et al., 1994; Igau et al., 1999; Ansmann et al., 2010). Пространственные особенности турбулентной конвекции в подоблачном слое во многом определяют структуру образующегося поля облаков. Классические модели, такие как модель метода слоя, различные модификации полуторамерных моделей и другие, используемые для анализа полей конвективных облаков (Довгальюк, Ивлев, 1998), к сожалению, не могут воспроизвести многие важные параметры, определяемые турбулентными процессами. Вихреразрешающее (LES) моделирование, позволяющее определять турбулентную статистику непосредственно «из принципов»

на основе решения уравнений движения, с успехом используется для детального анализа турбулентных процессов в атмосфере (Глазунов, 2010).

Основная цель данной работы — провести тестирование разработанной ранее LES модели полей кучевых облаков (Игнатъев, 2011) и сравнить численные результаты с данными наблюдений и результатами расчетов, имеющимися в литературе, а также провести предварительное исследование некоторых характеристик полей облаков, в частности оценить вертикальный профиль коэффициента турбулентной диффузии, определить функции распределения вертикальной скорости и доли площади восходящих и нисходящих потоков.

1. Тестовый расчет облачного поля

Разработанная ранее LES модель (Игнатъев, 2011) была протестирована для проверки ее работоспособности и оценки точности. В качестве основы для такого тестирования нами были выбраны результаты наблюдений, выполненных в области пассатных ветров (19° с. ш., 67° з. д.) к северу от острова Пуэрто-Рико 15 декабря 1972 г. (Pennell, LeMone, 1974, 1976), где исследовались два смежных района протяженностью 40 и 30 км.

В первом районе наблюдалась низкие кучевые облака со средней степенью закрытия небосвода около 14 %, во втором районе — кучевые облака, имеющие более хаотичное расположение со степенью закрытия около 70 %. Наблюдения и измерения проводились в течение полутора часов с помощью самолета, выполнявшего полеты на разных высотах по трассе протяженностью около 20 км с севера на юг и обратно. Над исследуемой областью отмечался восточный ветер со скоростью около 15 м/с и хорошо перемешанный подоблачный слой высотой около 600 м с практически постоянными потенциальной температурой и массовой долей водяного пара. Выше подоблачного слоя располагался влажно-неустойчивый слой, в котором наблюдался рост обла-

ков вплоть до высоты приблизительно 1500 м. Выше этого уровня начинался слой с абсолютно устойчивой стратификацией, препятствующей вертикальному росту облаков.

Система координат была выбрана следующим образом: ось X направлена на восток, ось Y — на север и ось Z — в вертикальном направлении. Расчетная область имела размеры $5 \times 5 \times 3,5$ км в направлениях X , Y и Z . Граничные условия задавались следующим образом: на боковых сторонах расчетной области — периодические граничные условия, на подстилающей поверхности — параметризованные потоки импульса, тепла и влаги на основе теории Момина—Обухова и сверху — непроницаемая граница без трения. Начальные условия для расчета задавались наиболее близко к ситуации, характерной для региона с закрытием неба: влажность около 14 %. Потенциальная температура у поверхности океана составила 298,8 К и сохранялась постоянной в расчете. Массовая доля водяного пара у поверхности океана принималась равной значению, соответствующему насыщению при температуре поверхности моря ($\langle \bar{q}_t \rangle = 0,0207$ кг/кг), и также сохранялась постоянной (здесь и далее угловыми скобками обозначено усреднение по горизонтали).

На рис. 1 приведены профили начальных значений осредненной по горизонтали потенциальной температуры, потенциальной виртуальной температуры и полного влагосодержания, использованных в расчете, а также профили температуры и температуры точки росы в зависимости от атмосферного давления.

Профили начальных значений скорости, а также компоненты постоянного (во времени) геострофического ветра приведены на рис. 2. Линейный рост x -компонента геострофического ветра от $-11,4$ м/с на уровне 1000 м до -20 м/с у поверхности Земли обусловлен горизонтальным глобальным градиентом температуры, направленным на юг; y -компонент геострофического ветра постоянен по вертикали и равен 5 м/с.

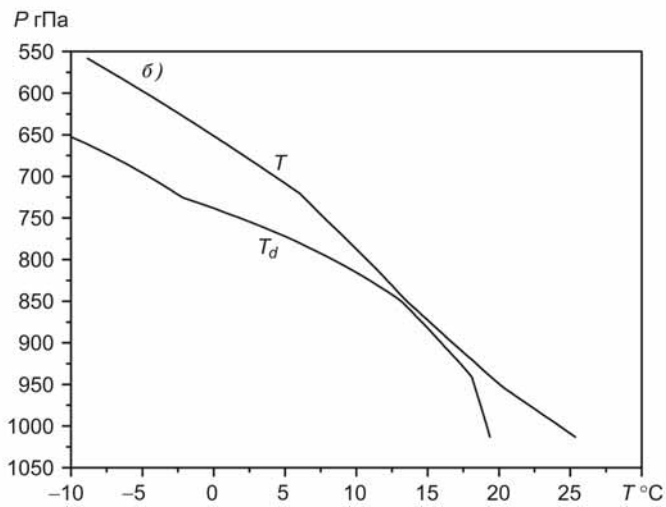
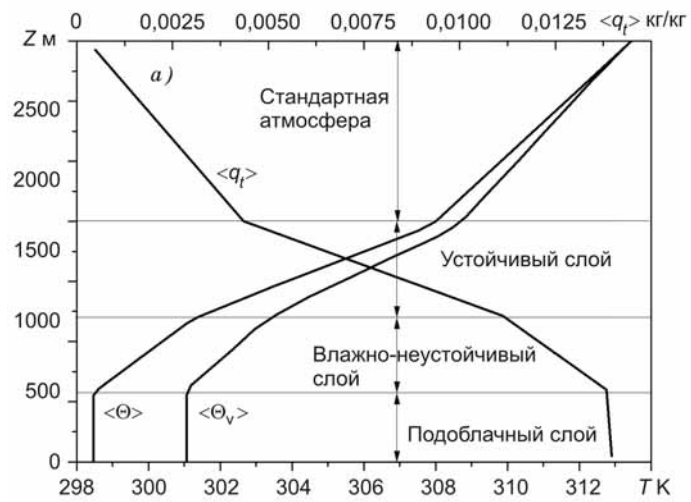


Рис. 1. Начальные (средние по горизонтали) профили: потенциальной температуры $\langle \Theta \rangle$, потенциальной виртуальной температуры $\langle \Theta_v \rangle$ и полного влагосодержания $\langle q_t \rangle$ (а), а также температуры T и температуры точки росы T_d (б).

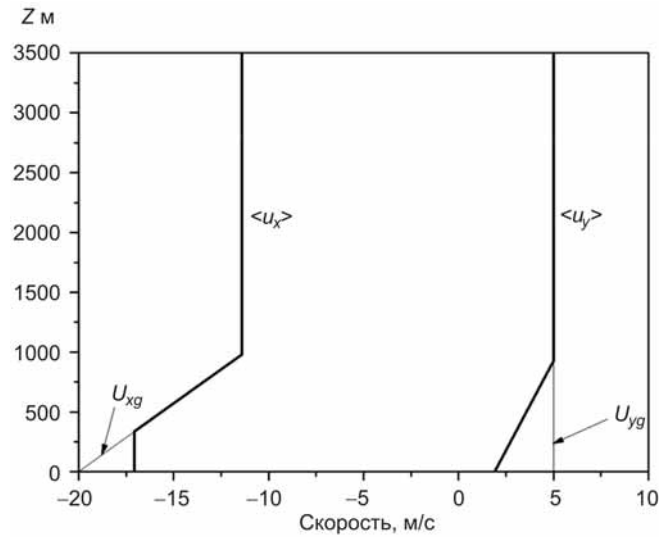


Рис. 2. Начальные (средние по горизонтали) профили скорости $\langle u_x \rangle$ и $\langle u_y \rangle$ (жирная линия) и компоненты геострофического ветра U_{xg} и U_{yg} (тонкая линия).

В нашей постановке мы используем упрощенную радиационную модель, полагая дивергенцию радиационного потока охлаждения постоянной и равной $\frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial F}{\partial z} = 0,054$ К/ч независимо от того,

присутствуют облака или нет. Это значение выбиралось из соображений баланса кинематического потока тепла от поверхности $\langle u'_z \theta'_l \rangle$, соответствующего динамическому потоку около 6 Вт/м^2 .

Величина аэродинамической шероховатости ($z_0 = z_{0,m} = z_{0,h}$), необходимой для расчета параметризованных потоков на поверхности, выбиралась с помощью соотношения, предложенного в работе Charnock (1955): $0,014 u_*^2 = g z_0$. Зная из наблюдений динамическую скорость $u_* = 0,45 \text{ м/с}$, получаем, что $z_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Начальные профили параметров, показанных на рисунках, задавались горизонтально однородными. Исключение составила температура в небольшом слое у подстилающей поверхности, где к температуре добавлялось небольшое случайное возмущение для инициализации турбулентной конвекции. Вблизи верхней границы в нескольких сеточных слоях задавалась повышенная вязкость для подавления гравитационных волн.

Для расчетов была разработана параллельная компьютерная программа, позволившая существенно ускорить вычисления и проводить расчеты на многопроцессорном кластере с использованием сеток, содержащих большое число ячеек (до 10 млн) за приемлемое время (от 1 ч до 3 сут). Были проведены расчеты описанного выше варианта с использованием трех равномерных сеток: $40 \times 40 \times 70$, $96 \times 96 \times 140$ и $192 \times 192 \times 280$ с размерами ячеек соответственно: $\Delta x = \Delta y = 125$ м, $\Delta z = 50$ м; $\Delta x = \Delta y = 52$ м, $\Delta z = 25$ м и $\Delta x = \Delta y = 26$ м, $\Delta z = 12,5$ м.

В начальный момент, когда облаков еще нет, все профили горизонтально однородны и полное влагосодержание меньше насыщения. Решение постепенно эволюционирует к развитому турбулентному состоянию. Примерно через час физического времени появляются первые облака в областях, где турбулентные флуктуации влажности и температуры приводят к появлению насыщенной среды. Основания облаков находятся на уровне около 600 м, а вершины после двух-трех часов достигают высоты около 1500 м. Облака вследствие сдвига ветра имеют вид наклонных башенок (рис. 3), характерный для пассатной облачности (Скорер, 1980).

Ниже наши результаты мы сравниваем также с результатами расчетов, представленных в работе Cuijpers & Duynkerke (1993), в которой продемонстрированы возможности LES метода для исследования полей облаков. В этой работе авторы проводили расчеты на одном процессоре на сетке $40 \times 40 \times 50$, получили временную зависимость закрытия небосвода, вертикальные профили турбулентных потоков импульса, тепла и влаги и сравнили результаты своих расчетов с данными наблюдений. В нашей работе

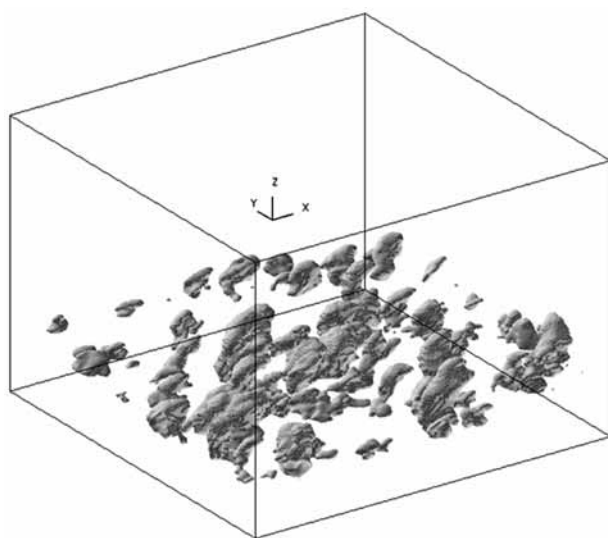


Рис. 3. Расчетная изоповерхность влажности (10^{-5} кг/кг) в момент времени 2,5 ч (сетка $192 \times 192 \times 280$).

мы используем похожую модель и вычислительный алгоритм, но применяем другой метод для решения уравнения Пуассона, а также проводим дополнительные расчеты вертикального распределения коэффициента турбулентной диффузии и функций распределения вертикальной скорости.

На рис. 4 показана временная эволюция степени закрытия небосвода, рассчитанная по площади вертикальной проекции всех облаков (ячеек с ненулевой влажностью), а также временная эволюция средней (по объему расчетной области) влажности. Представлены результаты на период после достижения квазистационарного турбулентного состояния для трех сеток, а также соответствующие результаты расчета Cuijpers & Duynkerke (1993). Расчетные значения степени закрытия на всех сетках имеют значения, близкие к наблюдаемому (14 %), как в наших расчетах, так и в расчете Cuijpers & Duynkerke (1993), однако, как это видно из рисунка, расче-

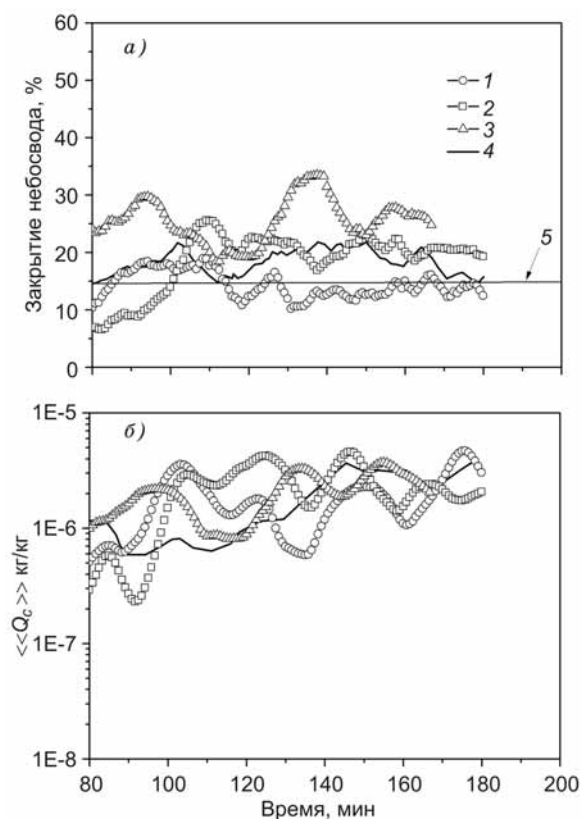


Рис. 4. Временная эволюция степени закрытия небосвода (а) и средней (по объему расчетной области) водности (б).

1 — результаты расчета Cuijpers & Duynkerke (1993); 2–4 — результаты расчетов авторов на сетках $40 \times 40 \times 70$ (2), $96 \times 96 \times 140$ (3), $192 \times 192 \times 280$ (4), 5 — наблюдаемое значение (Pennel & LeMone, 1974).

ты на более мелких сетках приводят к несколько большим значениям (до 20—30 %). Причина этого явления связана с принципиальным недостатком конденсационной схемы — она не учитывает подсеточную конденсацию. Впервые на эту проблему обратили внимание Sommeria & Deardorff (1977). Действительно, в силу дискретности вычислительного алгоритма в конденсационной схеме

каждая расчетная ячейка может иметь только два состояния: либо насыщенное, либо ненасыщенное. На самом деле, только часть воздуха в расчетной ячейке может находиться в насыщенном состоянии. Усреднение же по объему ячейки может привести к тому, что она вся окажется ненасыщенной. В этом случае тепло, которое выделилось бы при конденсации, не учитывается, что и является источником дополнительных ошибок. Простым измельчением сетки от этого недостатка вряд ли можно избавиться, так как облака в атмосфере имеют фрактальный характер (Sahlan & Joseph, 1989). В связи с этим, по-видимому, в будущем потребуется усовершенствовать конденсационную схему, введя в нее специальную подсеточную конденсацию. Этот вопрос требует отдельного исследования. Тем не менее результаты всех трех наших расчетов на разных сетках достаточно близки друг к другу и к наблюдаемому значению.

Важными характеристиками для сравнения являются вертикальные профили турбулентных потоков. На рис. 5 представлены вертикальные профили полных (разрешаемых + подсеточных) дисперсий (среднеквадратичных пульсаций) скоростей u_x и u_z

$$\sigma_x^2 = \langle u_x'^2 \rangle + 2\langle E \rangle / 3, \quad \sigma_z^2 = \langle u_z'^2 \rangle + 2\langle E \rangle / 3,$$

вертикального потока продольного импульса

$$\langle u_z' u_x' \rangle = \langle u_z' u_x' \rangle_{res} - K_m \left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} \right)$$

и вертикального потока плавучести (потока потенциальной виртуальной температуры):

$$\langle u_z' \theta_v' \rangle = \langle u_z' \theta_v' \rangle_{res} - K_h \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z},$$

где E — подсеточная кинетическая энергия турбулентных пульсаций, K_m и K_h — подсеточные коэффициенты турбулентного переноса импульса и тепла соответственно.

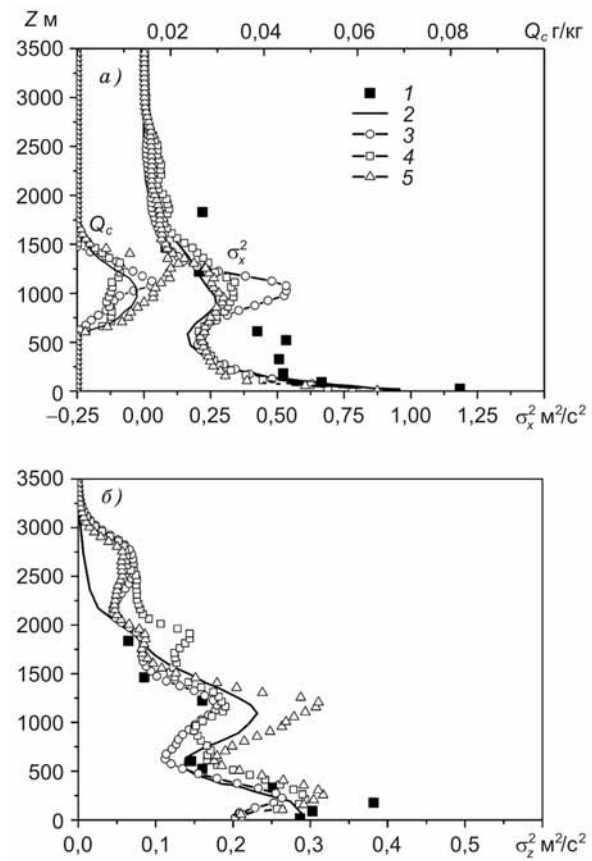
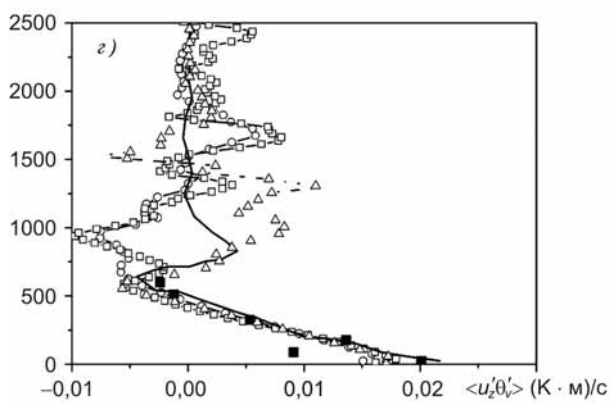
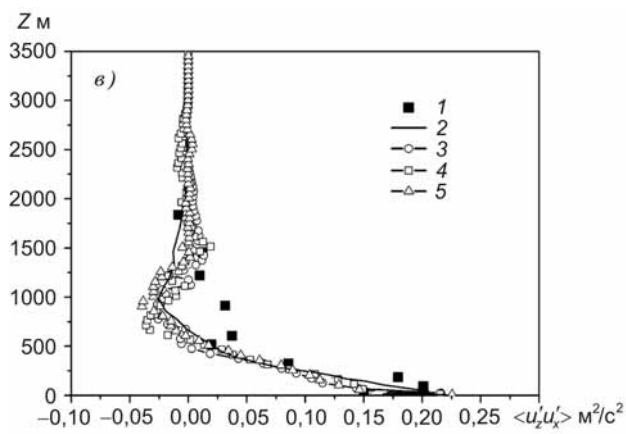


Рис. 5. Сравнение результатов расчетов с данными потоков в момент
 а — дисперсия продольной скорости и профиль средней водности, продольного импульса,
 1 — данные наблюдений (Pennel & LeMone, 1974); 2 — результаты расчета авторов на сетках $40 \times 40 \times 70$ (3),



наблюдений — вертикальные профили турбулентных
времени 2 ч 35 мин.

b — дисперсия вертикальной скорости, *v* — вертикальный поток
z — поток плавучести.

расчета (Cuijpers & Duynkerke (1993); 3—5 — результаты
 $96 \times 96 \times 140$ (4), $192 \times 192 \times 280$ (5).

На рис. 5 *a* приведен дополнительно средний профиль водности $\langle Q_c \rangle$, из которого видно положение нижней и верхней границ облачного поля (600 и 1500 м соответственно), что также согласуется с данными наблюдений. Из рис. 5 *a* видно также, что среднеквадратичные пульсации скоростей зависят от величины $\langle Q_c \rangle$. Выделение скрытого тепла по мере роста облаков приводит к усилению турбулентности, что отражается на увеличении среднеквадратичных пульсаций. Поток плавучести (потенциальной виртуальной температуры) линейно уменьшается до уровня облачных оснований и затем становится отрицательным, равным по абсолютному значению 20—30 % значения на поверхности. По данным измерений, на уровне облачных оснований это значение составляет около 7 %. В принципе, можно считать это неплохим совпадением для подоблачного слоя. Внутри же облачного слоя поток потенциальной виртуальной температуры показывает значительные вариации в зависимости от количества облаков.

Как можно видеть из рисунков, согласие между данными наблюдений и результатами расчета данными в целом удовлетворительное. Однако необходимо сделать следующее замечание по поводу сеточной сходимости. Дело в том, что полученные нами вертикальные распределения есть результат осреднения случайного процесса. Величины, заключенные в угловые скобки, на каждом уровне z рассчитывались как средние по всем ячейкам на данном горизонтальном слое. Ясно, что на грубой сетке качество осреднения хуже, чем на мелкой. Поэтому, строго говоря, для получения гладких распределений, которые можно было бы анализировать с точки зрения сеточной сходимости, необходимо проводить осреднение не только по горизонтали, но и по достаточно большому ансамблю статистически независимых расчетов, отличающихся друг от друга только случайным начальным возмущением. Поскольку у нас не было возможности проводить такой объем вычислений, мы ограничились только горизонтальным осреднением, что, хотя и не дало возможности наблюдать классическую сходимость по сетке, но позволило сделать качественный вывод о том, что результаты на всех трех сетках достаточно близки друг к другу.

2. Вертикальный профиль коэффициента турбулентной диффузии

Для выяснения физической картины и характера турбулентного обмена в подоблачном слое дополнительно задавалась пассивная примесь, играющая роль маркера (M), равного в начальный момент нулю в подоблачном слое и единице в остальной части области. Предполагалось, что процессы вовлечения и проникновения воздуха из подоблачного слоя в верхние слои в процессе развития турбулентного облачного слоя будут отражаться на поведении изоповерхности маркера $M = 1/2$, так что качественно эти процессы можно будет наблюдать по результатам LES моделирования. Кроме того, зная вертикальный профиль маркера и его потока (осредненных по горизонтали), можно оценить полный коэффициент турбулентной диффузии как отношение

$$K_{turb} = -\frac{\langle u'_z M' \rangle_{total}}{\partial \langle M \rangle / \partial z}$$

на тех участках, где вертикальная производная $\partial \langle M \rangle / \partial z$ не слишком близка к нулю.

На рис. 6 представлены вертикальные профили концентрации маркера и коэффициента K_{turb} , полученные при расчете на различных сетках. Из рисунка видно, что в подоблачном слое происходит интенсивное турбулентное перемешивание, и это проявляется в том, что профиль концентрации маркера там более равномерный, чем в облачном слое. Коэффициент турбулентной диффузии в подоблачном слое имеет характерный пик примерно в середине слоя с максимумом 70—80 м²/с; при этом профили для всех трех сеток в подоблачном слое практически совпадают. В облачном же слое коэффициент турбулентной диффузии меньше и составляет порядка 10—20 м²/с, хотя для самой мелкой сетки (с вертикальным шагом 12,5 м) этот коэффициент несколько выше,

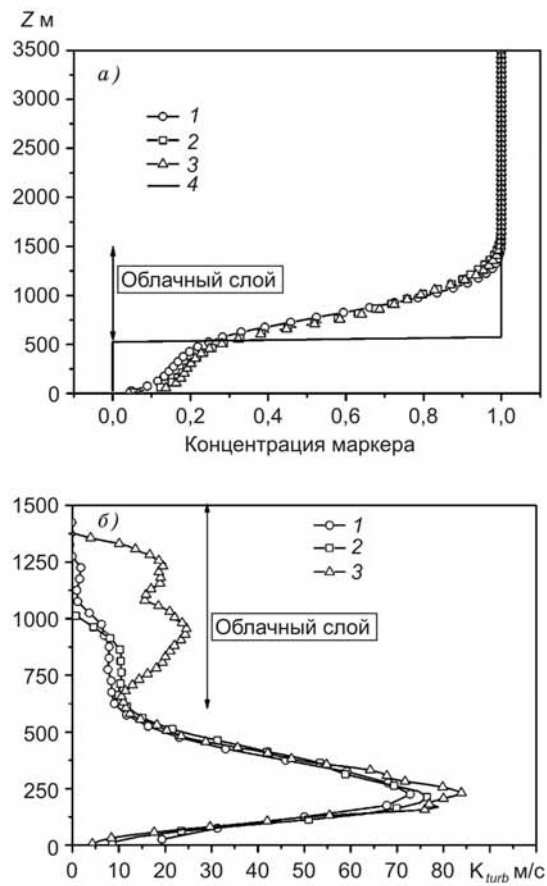


Рис. 6. Вертикальный профиль концентрации маркера (а) и коэффициента турбулентной диффузии (б) к моменту времени 2 ч 35 мин.

1—3 — результаты расчета авторов на сетках $40 \times 40 \times 70$ (1), $96 \times 96 \times 140$ (2) и $192 \times 192 \times 280$ (3); 4 — начальное распределение маркера.

чем для двух более грубых сеток, что связано, вероятно, с большим числом мелких облаков, которые на грубых сетках не разрешаются.

На рис. 7 показана изоповерхность $M = 1/2$, на которой хорошо различимы вертикальные всплески, совпадающие с наиболее крупными облаками и содержащие повышенную концентрацию воздуха из подоблачного слоя. Это свидетельствует о важной роли полей облаков в процессе обмена между приземным слоем воздуха и более высокими слоями атмосферы.

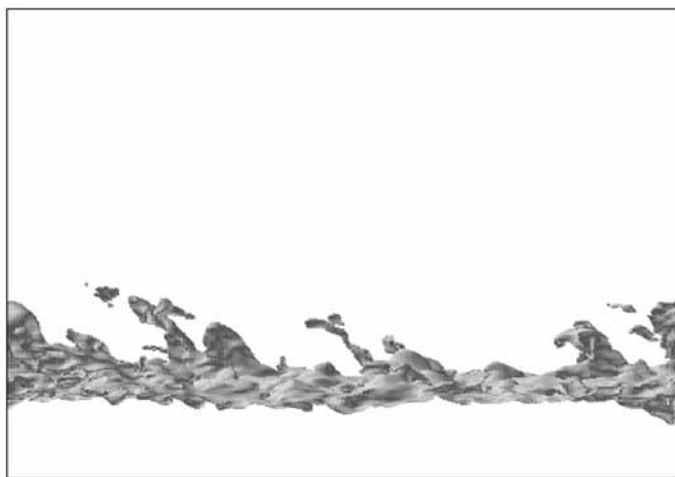


Рис. 7. Изоповерхность маркера $M = 1/2$ в момент времени 2 ч 35 мин.

3. Функции распределения вертикальной скорости

Знание детальной турбулентной структуры конвективного облачного слоя важно для более полного понимания физической картины, что может оказаться полезным при разработке упрощенных параметрических моделей полей облаков (Greenhut and Khalsa, 1982; Ansmann et al., 2010). Вихреразрешающее (LES) моделирование позволяет «увидеть» детальную пространственно-временную турбулентную структуру и определить многие параметры непосредственно по результатам численного моделирования.

На рис. 8 приведена функция распределения плотности вероятности вертикальной скорости $f(u_z)$ для двух высот и гистограммы долей площади, приходящейся на нисходящие и восходящие потоки на разных высотах, рассчитанных для рассмотренного выше облачного поля. Произведение $f(u_z)du_z$ представля-

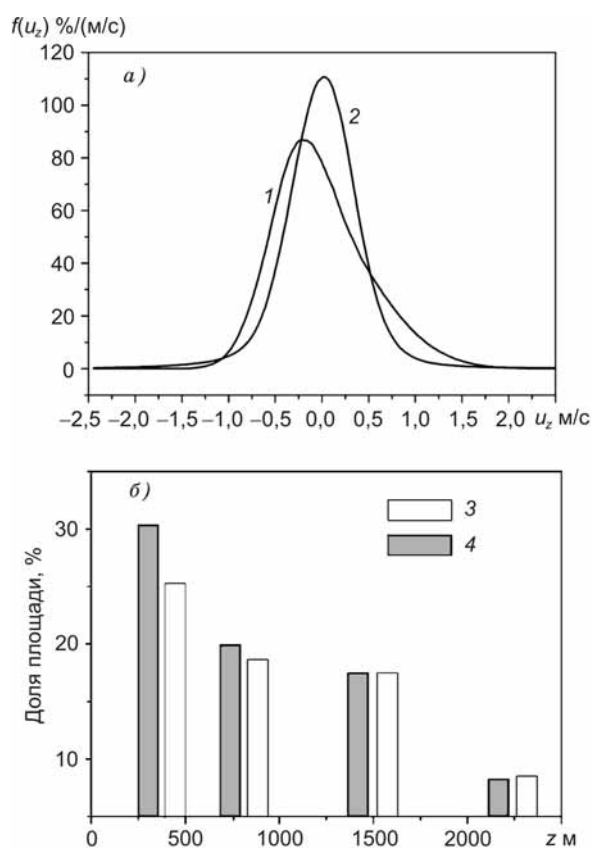


Рис. 8. Функции распределения плотности вероятности вертикальной скорости (а) и доля площади восходящих и нисходящих потоков (б).

а: 1) $z = 350$ м, $\sigma = 0,512$, $s = 0,611$, $k = 0,976$; 2) $z = 1200$ м, $\sigma = 0,442$,
 $s = -0,216$, $k = 3,726$; б: 3) восходящие потоки; 4) нисходящие потоки.

ет собой повторяемость (или вероятность) скорости в интервале от u_z до $u_z + du_z$. На рисунке также приведены статистические моменты для функций распределения — дисперсия σ , асимметрия s и эксцесс k :

$$\sigma^2 = \int f(u_z)(u_z - \bar{u}_z)^2 du_z, \quad s = \int f(u_z) \left(\frac{u_z - \bar{u}_z}{\sigma} \right)^3 du_z,$$

$$k = \int f(u_z) \left(\frac{u_z - \bar{u}_z}{\sigma} \right)^4 du_z - 3,$$

где $\bar{u}_z = \int u_z f(u_z) du_z$ — средняя вертикальная скорость, которая при отсутствии глобального вертикального перемещения воздушных масс (как в нашем случае) равна нулю.

Асимметрия и эксцесс характеризуют степень отклонения распределения от гауссова распределения. Если они равны нулю, то распределение является гауссовым.

При расчете долей площадей вводился условный порог скорости $u_z^{\text{lim}} > 0$, по которому определялся тип вертикального течения в каждой расчетной ячейке на рассматриваемом уровне:

при $u_z < -u_z^{\text{lim}}$ нисходящее течение,

при $u_z > u_z^{\text{lim}}$ восходящее течение,

при $u_z^{\text{lim}} > u_z > -u_z^{\text{lim}}$ окружающая среда.

В работе Greenhut and Khalsa (1982) рекомендуется в качестве порогового значения выбирать $u_z^{\text{lim}} \approx \sigma$. Для нашего анализа было выбрано значение $u_z^{\text{lim}} = 0,3$ м/с.

Из рис. 8 видно, что характер конвекции зависит от высоты. В подоблачном слое функция распределения вертикальной скорости более асимметрична и имеет более широкий профиль, чем в облачном слое, а нисходящие потоки здесь занимают немного большую площадь, чем восходящие.

Заключение

В работе приведены результаты тестирования разработанной ранее вихреразрешающей (LES) модели полей кучевых облаков малой вертикальной протяженности (полей внутримассовых кучевых облаков мелкой конвекции и полей пассатных кучевых облаков). Для расчетов была разработана параллельная программа, что позволило проводить вычисления на многопроцессорном кластере и существенно уменьшить время счета. Расчеты были выполнены на трех различных сетках с вертикальным шагом 50, 25 и 12,5 м соответственно.

Сравнение результатов расчетов с данными наблюдений и результатами расчетов других авторов, имеющимися в литературе, показало, что разработанная модель в целом адекватно воспроизводит вертикальные распределения турбулентных потоков и степень закрытия небосвода. Использование трех сеток позволило также сделать вывод о недостатке используемой конденсационной схемы, который заключается в отсутствии учета подсеточной конденсации, приводящем к дополнительным ошибкам. Выяснение этого вопроса требует отдельного исследования.

В расчетах были также определены: положение нижней и верхней границы облаков; вертикальный профиль влажности; вертикальный профиль коэффициента турбулентной диффузии, рассчитанный с помощью метода пассивной примеси (маркера); функции распределения плотности вероятности вертикальной скорости на различных высотах, а также доли площади нисходящих и восходящих потоков.

Полученные результаты LES моделирования показали более широкие возможности этого метода по сравнению с классическими подходами (метод слоя и др.), так как позволили «увидеть» детальную пространственно-временную структуру турбулентного облачного и подоблачного слоя и проанализировать те величины, которые не могли быть рассчитаны с помощью классических моделей (турбулентные потоки и другие параметры).

Расчеты были выполнены на параллельном кластере МГУ «Чебышев».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амитина И. М., Довгалюк Ю. А. (1979).* К расчету характеристик полей конвективных облаков // Труды ГГО. Вып. 405. С. 10—15.
- Бекряев В. И., Довгалюк Ю. А., Зинченко А. В. (1979).* Определение некоторых свойств ансамбля конвективных облаков по данным аэрологического зондирования // Труды ГГО. Вып. 405. С. 3—9.
- Глазунов А. В. (2010).* О влиянии направления геострофического ветра на турбулентность и квазиупорядоченные крупномасштабные структуры в пограничном слое атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 46, № 6. С. 786—807.
- Довгалюк Ю. А., Ивлев Л. С. (1998).* Физика водных и других атмосферных аэрозолей. — СПб: Изд.-во СПб ГУ.
- Игнатъев А. А. (2011).* LES модель полей конвективных облаков // Труды ГГО. Вып. 564.
- Облака и облачная атмосфера (1989). Справочник / Под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана. — Л.: Гидрометеониздат. — 647 с.
- Скорер Р. (1980).* Аэрогидродинамика окружающей среды. — М.: Мир. 549 с.
- Шнееров Б. Е., Мелешко В. П., Соколов А. П., Шейнин Д. А., Любанская В. А., Спорышев П. В., Матюгин В. А., Катцов В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В. (1997).* Глобальная модель общей циркуляции атмосферы и верхнего слоя океана // Труды ГГО. Вып. 544. С. 3—123.
- Ansmann A., Frunke J. and Engelmann R. (2010).* Updraft and downdraft characterization with Doppler lidar: cloud-free versus cumuli-topped mixed layer // Atmos. Chem. Phys. V. 10. P. 7845—7858.
- Cahalan R. F., Joseph J. H. (1989).* Fractal statistics of cloud fields // Mon. Wea. Rev. V. 117. P. 261—271.
- Charnock H. (1955).* Wind stress on a water surface // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. V. 81. P. 639.
- Cuijpers, J. W. M., Duynkerke, P. G. (1993).* Large eddy simulation of trade cumulus clouds // J. Atmos. Sci. V. 50. P. 3894—3908.
- Greenhut G. K. and Khalsa S. J. S. (1982).* Updraft and downdraft events in the atmospheric boundary layer over the equatorial Pacific Ocean // J. Atmos. Sci. V. 39. P. 1803—1817.
- Igau R. C., LeMone M. A. and D. Wei (1999).* Updraft and downdraft cores in TOGA COARE: Why so many buoyant downdraft cores? // J. Atmos. Sci. V. 56. P. 2232—2245.

LeMone M. A. and Zipser E. J. (1980). Cumulonimbus vertical velocity events in GATE. Part I: Diameter, intensity and mass flux. // J. Atmos. Sci. V. 37. P. 2444—2457.

Lucas C., Zipser E. J., LeMone M. A. (1994). Vertical velocity of tropical Australia // J. Atmos. Sci. V. 51. P. 3183—3193.

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.

Pennell W. T., LeMone M. A. (1976). The relationship of trade wind cumulus distribution to subcloud layer fluxes and structure // Mon. Wea. Rev. V. 104. P. 524—539.

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

УДК 551.510.7

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОГО РАССЕЙНИЯ
ИЗЛУЧЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ
ЧАСТИЦЕЙ**

Ю. Б. Ржонсницкая

Российский государственный гидрометеорологический университет
195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 96
E-mail: zhjul@rambler.ru

Поступила в редакцию 27.06.2011
Поступила после доработки 30.07.2011

Введение

В работе Ржонсницкой (2011) объясняются результаты сравнения фотоэлектрических и фильтровых измерений. С этой целью в ней проанализировано решение дифференциальных уравнений электромагнитного поля при фиксированном угле рассеяния $\pi/2$ для модели сферической частицы с радиально переменным показателем преломления. Оказалось, что результаты оптических измерений могут существенно зависеть от структуры частиц. При определении размеров частиц оптическими методами могут иметь место значительные погрешности, значения которых указаны в работе Yegorov et al. (2008). В то же время, при измерениях характеристик атмосферного аэрозоля в лабораторных условиях удалось достичь существенного уменьшения влияния структуры частиц на результаты измерений за счет выбора угла рассеяния излучения (Massoli et al., 1998).

Настоящее исследование направленного рассеяния излучения относится к условиям натуральных измерений в атмосфере, когда оптические свойства частиц изменяются в существенно более широких пределах.

1. Моделирование направленного аэрозольного рассеяния

Математическое моделирование характеристик ослабления частицей электромагнитных волн с круговой частотой $\omega = kc$ и напряженностью электрического $\mathbf{E}\exp(i\omega t)$ и магнитного $\mathbf{H}\exp(i\omega t)$ полей предполагает решение относительно векторов \mathbf{E} , \mathbf{H} системы уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = ikm^2\mathbf{E}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -ik\mathbf{H}, \quad (1)$$

где k — волновое число, c — скорость света, $m = n - i\chi$ — комплексный показатель преломления частицы.

Так же как и в работе Ржонсницкой (2011), рассматривается модель неоднородной частицы с радиально изменяющимся показателем преломления в оболочке, покрывающей однородное ядро:

$$\begin{aligned} m(\rho_0) &= m_0 \quad \text{при } 0 \leq \rho \leq \rho_0, \\ m(\rho) & \quad \text{при } \rho_0 < \rho \leq \rho_1, \\ m(\rho_1) &= 1 \quad \text{при } \rho > \rho_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\rho = kr$ — волновое расстояние, r — расстояние от центра, $\rho_1 = kr_1$ — приведенный радиус частицы, r_1 — радиус частицы, $\rho_0 = kr_0$ — приведенный радиус ядра частицы, r_0 — радиус ядра частицы.

Задача решается методом, развивающим метод, предложенный в работе Perelman (1996), и незначительно отличающимся от метода, изложенного в работе Ржонсницкой (2011).

Индикатриса рассеяния I находится по формуле

$$I = \left| \sum_1^{\infty} \frac{2j+1}{j(j+1)} (a_j S_j + b_j Q_j) \right|^2 + \left| \sum_1^{\infty} \frac{2j+1}{j(j+1)} (a_j Q_j + b_j S_j) \right|^2, \quad (3)$$

где S_j и Q_j — угловые функции, связанные с присоединенными функциями Лежандра;

$$a_j = \frac{Y_j(\rho_1)\rho_1 - \tau_j(\rho_1)}{Y_j(\rho_1)\rho_1 - \tau_j(\rho_1) + i\varphi_j(\rho_1)(Y_j(\rho_1)\rho_1 - \kappa_j(\rho_1))},$$

$$b_j = \frac{Z_j(\rho_1)\rho_1 - \tau_j(\rho_1)}{Z_j(\rho_1)\rho_1 - \tau_j(\rho_1) + i\varphi_j(\rho_1)(Z_j(\rho_1)\rho_1 - \kappa_j(\rho_1))},$$

$$\tau_j = -j + \rho_1^2 / (j - \tau_{j-1}),$$

$$\kappa_j = -j + \rho_1^2 / (j - \kappa_{j-1}),$$

$$\varphi_j = \varphi_{j-2} + (2j-1)(\varphi_{j-1} - \varphi_{j-2}) / (j - \tau_{j-1}),$$

$$\tau_0 = \rho_1 \operatorname{ctg} \rho_1, \quad \kappa_0 = -\rho_1 \operatorname{tg} \rho_1, \quad \varphi_0 = \operatorname{ctg} \rho_1, \quad \varphi_{-1} = -\operatorname{tg} \rho_1;$$

функции Y , Z удовлетворяют дифференциальным уравнениям Риккати.

2. Результаты моделирования аэрозольного рассеяния

Результаты расчетов для частицы с ядром из сажи с показателем преломления $1,82 - 0,64i$ представлены на рис. 1 и 2.

На рисунках $\operatorname{IR}(1)/\operatorname{IR}(1,33)$ — относительная индикатриса рассеяния. Угол рассеяния меняется от 0 до 90° , $\operatorname{IR} = I(L)/I(0)$, $L = \rho_1 - \rho_0$ — безразмерная толщина покрытия,

$$\operatorname{IR}(1,33): m = (0,98 - 1,28i)/(1 + d) + 0,84 + 0,64i, \quad (4)$$

$$\operatorname{IR}(1): m = (1,64 - 1,28i)/(1 + d) + 0,18 + 0,64i, \quad (5)$$

$d = (\rho - \rho_0)/(\rho_1 - \rho_0)$, $\rho = \rho_0(1 + 0,01k)$. Величина $(1+0,01k)$ представляет собой отношение размера частицы, включая покрытие, к размеру ее ядра.

Формула (4) моделирует неоднородное покрытие из сажи с водой. Формула (5) моделирует неоднородное покрытие из сажи без воды.

На пространственном рис. 1 приведены зависимости величины $IR(1)/IR(1,33)$ от величин ρ_0 , k . В плоскости $\rho_0 k$ на рис. 1 z , построенном для угла рассеяния фотоэлектрических измерений 90° , имеется кривая минимумов отношений $IR(1)/IR(1,33)$.

Величина $IR(1)/IR(1,33)$ на рис. 2 e соответствует минимуму относительной индикатрисы рассеяния. Приведенные данные соответствуют экспериментальным результатам, показывающим существенное уменьшение индикатрисы рассеяния, которое объясняется структурированностью частицы. На рис. 2 $a—2 d$ приведены отношения $IR(1)/IR(1,33)$ на кривой минимумов для других углов рассеяния. При угле рассеяния менее 30° эффект уменьшения индикатрисы рассеяния за счет структурированности частицы выражен значительно слабее.

Заключение

При определении оптическими методами размеров частиц атмосферного аэрозоля в натуральных условиях можно достичь существенного уменьшения влияния структуры частиц на результаты измерений за счет выбора угла рассеяния излучения. Этот результат получен при использовании модели сферической частицы с радиально переменным показателем преломления, адекватно описывающей результаты сравнения фотоэлектрических и фильтровых измерений.

Работа выполнена в рамках мероприятий 1.2.1, 1.2.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг. по направлению «Физика атмосферы» (государственные контракты № П781 от 24 мая 2010 г., № П1037 от 31 мая 2010 г.).

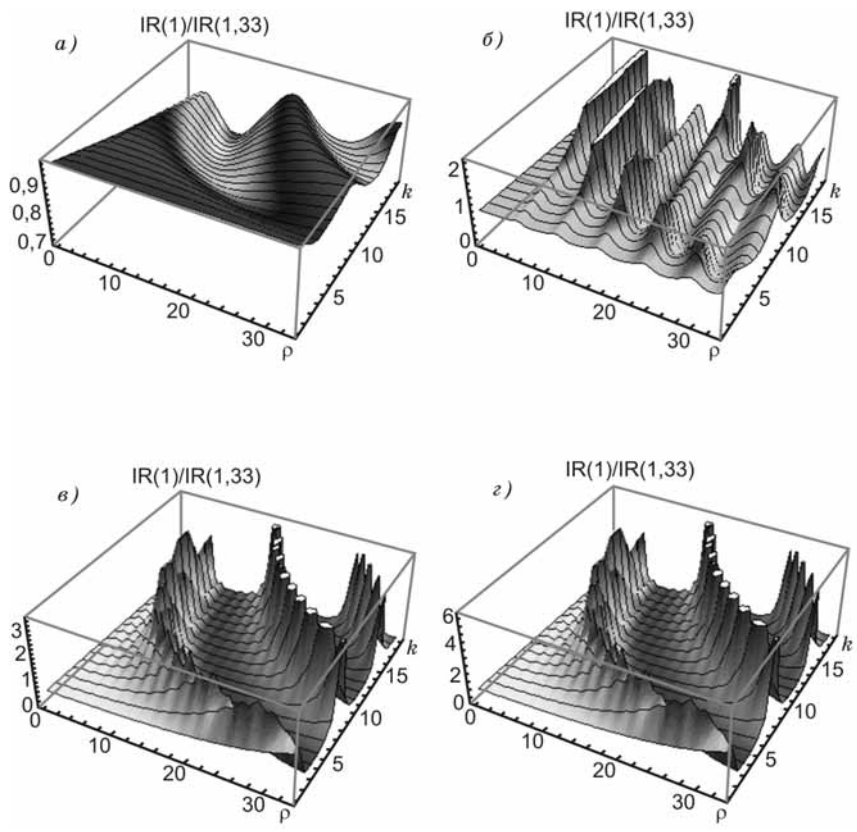


Рис. 1. Зависимость относительной индикатрисы рассеяния от структуры и размера частицы.

$k = 1, 2, \dots, 19; \quad \rho \in [0, 33]$.

Рисунок	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>з</i>
Угол рассеяния	0°	30°	60°	90°

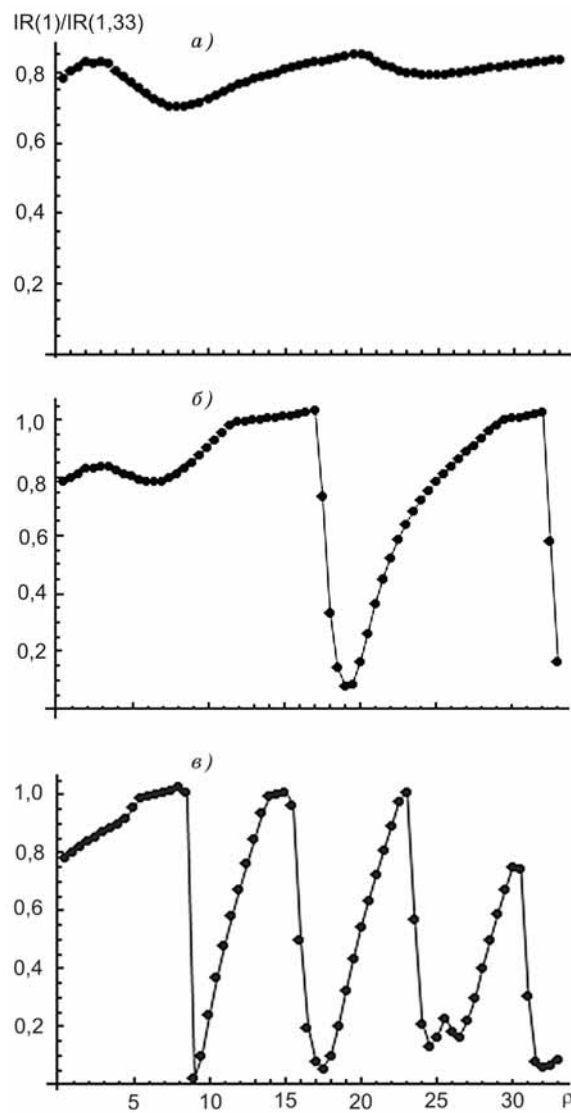
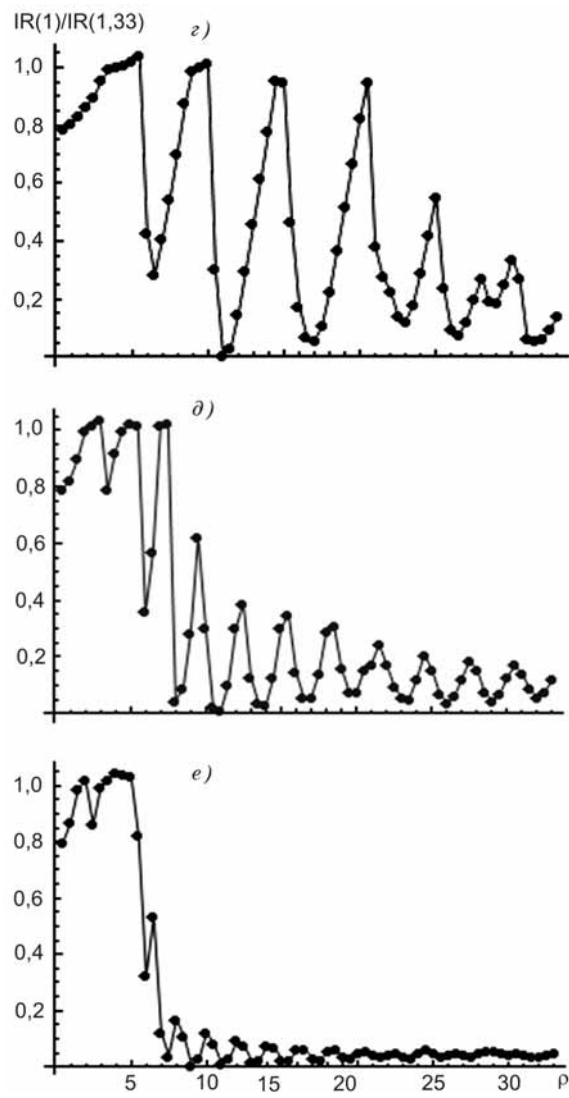


Рис. 2. Изменение индикатрисы рассеяния структурированной

Рисунок.....	<i>a</i>	<i>б</i>
Угол рассеяния.....	0°	10°



частицы, связанное с изменением показателя преломления.

φ z θ e
 20° 30° 60° 90°

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ржонсницкая Ю. Б. (2011). Моделирование рассеяния излучения неоднородной аэрозольной частицей // Труды ГГО. Вып. 563. С. 214—222.

Yegorov A. D., Potapova I. A., Rzhonsnitskaya Yu. B. (2008). Atmospheric aerosols measurements and reliability problem // Int. J. Remote Sensing. V. 29. P. 2449—2468.

Massoli P., Lazzaro M. (1998). Characterization of radially inhomogeneous spheres by light scattering methods // Nürnberg: PARTEC 98. 7th European Symposium on Particle Characterization. P. 527—536.

Perelman A. Y. (1996). Scattering by particles with radially variable refractive indices // Appl. Optics. V. 35, No. 27. P. 5452—5460.

УДК 551.582

**ОЦЕНКА «РИСКА ДОВЕРИЯ» КЛИМАТИЧЕСКОМУ
ПРОГНОЗУ МЕТОДОМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Л. П. Галюк¹, Н. В. Кобышева¹, Н. Рыбалка²

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

² Санкт-Петербургский государственный университет
194021 Санкт-Петербург, 10-я линия В.О., 10
E-mail: kobishnv@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 18.10.2011

Введение

Приемлемость результатов моделирования будущего климата обычно проверяется расчетами по моделям на ретроспективном материале. Для валидации моделей применяется также метод экспертных оценок. Однако при принятии хозяйственных решений, при использовании климатических параметров в нормативных документах, при выборе той или иной адаптационной стратегии традиционных методов контроля результатов моделирования недостаточно. Система моделирования климата обладает рядом неопределенностей, неполнотой и недостаточной четкостью исходной информации об основных параметрах. При использовании такой сложной системы и тем более при усложнении ее со временем уменьшается наша возможность делать точные и в то же время значащие выводы.

В подобных случаях значимость полученных количественных климатических оценок может уточняться методом нечеткой логики или нечетких (размытых) множеств. В последнее время сфера применения методологии нечеткой логики, которая была впервые предложена Л. Заде (Заде, 1965), все больше расширяет-

ся. Первоначально Заде полагал, что его теория, в основу которой закладываются лингвистические переменные, будет использоваться в таких областях, как экономика, психология, лингвистика. Однако оказалось, что в ряде случаев при расчетах данными методами с использованием неточной и недостаточно точной информации возможно достижение хорошего и устойчивого (робастного) решения, согласующегося с реальностью и с низкой стоимостью. При этом методика нечетких множеств позволяет оценить уровень значимости получаемой субъективной оценки.

Несмотря на близость теории нечетких множеств к теории вероятности, прежде всего по объекту исследования, между ними имеются и принципиальные различия. Обе теории оперируют данными, обладающими неопределенностью, имеющей, однако, разную природу. Неопределенность в теории размытых множеств связана с классами, для которых не существует резкой границы между входящими и не входящими в данный класс элементами. Неопределенность не зависит от исхода какого-либо события и не связана со случайностью. В теории вероятности неопределенность связана с принадлежностью либо непринадлежностью к неразмытому множеству (классу с четкими границами). Другими словами, теория нечетких множеств адекватно описывает понятия и процессы, в которых параметры и цели не имеют точных границ.

Теоретические основания подхода, основанного на теории нечетких множеств, вполне точны и строги в математическом смысле и не являются сами по себе источником неопределенности. В каждом конкретном случае степень точности решения может быть согласована с требованиями задачи и точностью имеющихся данных. Подобная гибкость составляет одну из важных черт рассматриваемого метода.

Строгое определение нечеткого множества выглядит следующим образом. Размытым (нечетким) множеством A на множестве X называется совокупность пар вида $[x, \mu_A(x)]$, где $x \in X$, а $\mu_A(x)$ — функция от x , принимающая значения от 0 до 1. Значе-

ние функции $\mu_A(x)$ для конкретного элемента x называется степенью принадлежности этого элемента нечеткому множеству A (Левнер и др., 1998).

Аппаратное обеспечение теории нечетких множеств достаточно своеобразно, а решаемые задачи в каждом случае требуют своего специального подхода.

1. Подготовка климатических рядов к анализу методами нечеткой логики

Рассмотрим применение данной теории на конкретном примере.

Для оценки моделируемой средней месячной температуры воздуха используем в качестве исходного материала 100-летние ряды средних месячных температур воздуха на метеостанции Санкт-Петербург за период 1908—2007 гг. и моделируемые средние месячные значения температуры воздуха на последующие 20 лет.

На первом этапе проводятся исследования риска изменчивости выбранного ряда. Исходный ряд разбивается на равные интервалы, в данном случае на пять интервалов (пять нечетких множеств). Разбивка хронологического ряда на интервалы позволяет при использовании методики нечетких множеств более полно описать особенности изменения температуры воздуха за 100 лет.

Затем по всему ряду температуры воздуха рассчитываются тренд и модули отклонения от него за каждый год. Полагаем, основываясь на исследованиях Парето (Математическая энциклопедия, 1984), что основную информацию об особенностях временной изменчивости температуры воздуха несут значения ряда температуры, превышающие 80 %-ные квантили (рис. 1). Получаем пять нечетких множеств значений модулей, выходящих за пределы квантили $t_{80\%}$. В каждом интервале рассчитывается вероятность выхода модулей за 80 %-ную квантиль p_i , а также нор-

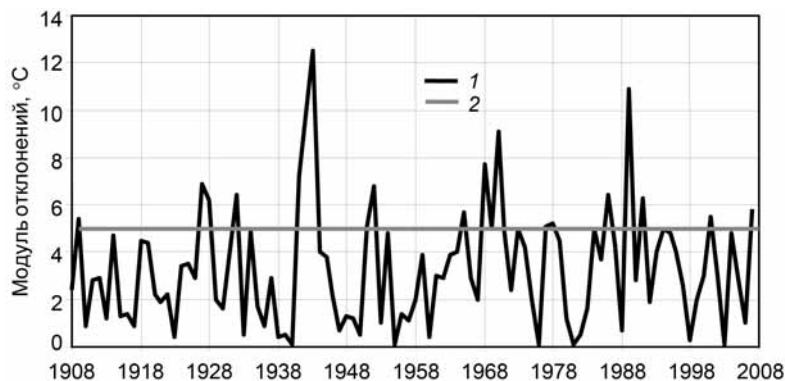


Рис. 1. Модули отклонений от тренда температуры воздуха. Январь.
 1 — модуль отклонений от тренда, 2 — квантиль 80 %.

мированное среднее отклонение от $t_{80\%}$, которое обозначено как d_i . Вероятности p_i характеризуют риски выхода случайной составляющей ряда модулей за границу 80 %-ной квантили в различных частях исследуемого ряда.

Интегральное распределение d_i может быть описано функцией распределения Парето:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - (1 - kx/a)^{1/k} & 1 - kx/a \geq 0, k \neq 0, a > 0, \\ 1 - \exp(-x/a) & x \geq 0, k = 0, a > 0; \end{cases}$$

$$f(x) = \begin{cases} (1/a)(1 - kx/a)^{1/k} & 1 - kx/a \geq 0, k \neq 0, a > 0, \\ (1/a)\exp(-x/a) & x \geq 0, k = 0, a > 0; \end{cases}$$

$$a = \frac{M}{2} \left(\frac{M^2}{\sigma^2} + 1 \right); \quad k = \frac{1}{2} \left(\frac{M^2}{\sigma^2} - 1 \right),$$

где M — математическое ожидание x , σ — среднее квадратическое отклонение x .

2. Определение функции принадлежности размытых множеств

На основе анализа полученных нечетких множеств и экспертных оценок выбираются функции принадлежности.

Нечеткое множество значений p_i (вероятности модулей отклонений средней месячной температуры от $x_{80\%}$) ранжируется и представляется в виде интегрального распределения P_j .

Каждое из $P_j = 80\%$ сопоставляется с соответствующим d_j .

Введем лингвистические переменные, качественно характеризующие уровни риска выхода значений модулей отклонения за 80% -ную квантиль. Такими переменными будут:

низкий (пренебрежимый) уровень риска,
средний (допустимый) уровень риска,
высокий (недопустимый) уровень риска.

Для каждой из этих переменных можно подобрать функцию принадлежности определенного вида — соответственно μ_1 , μ_2 и μ_3 (на рис. 2 по оси ординат отложены значения функции принадлежности μ , а по оси абсцисс — вероятность отклонения модулей P_j).

Вероятностям 0,2, 0,5, 0,8 на оси абсцисс соответствуют максимальные значения функции принадлежности, равные единице. Значение функции принадлежности 0,2 соответствует низкому уровню риска, 0,5 — среднему, а 0,8 — высокому.

Все три функции принадлежности могут быть объединены в единую комплексную функцию принадлежности, представленную на рис. 3. Входами в график функции служат $x = P_j$.

Комплексная функция принадлежности описывается следующими формулами:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 0,2, \\ 5(0,4 - x) & 0,2 \leq x < 0,4, \\ 0 & 0,4 \leq x \leq 1; \end{cases}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0,2, \\ 5(x - 0,2) & 0,2 \leq x \leq 0,4, \\ 1 & 0,4 \leq x \leq 1; \\ 5(x - 0,2) & 0,6 \leq x < 0,8, \\ 0 & 0,8 \leq x \leq 1; \end{cases}$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0,6, \\ 5(x - 0,6) & 0,6 \leq x < 0,8, \\ 1 & 0,8 \leq x \leq 1. \end{cases}$$

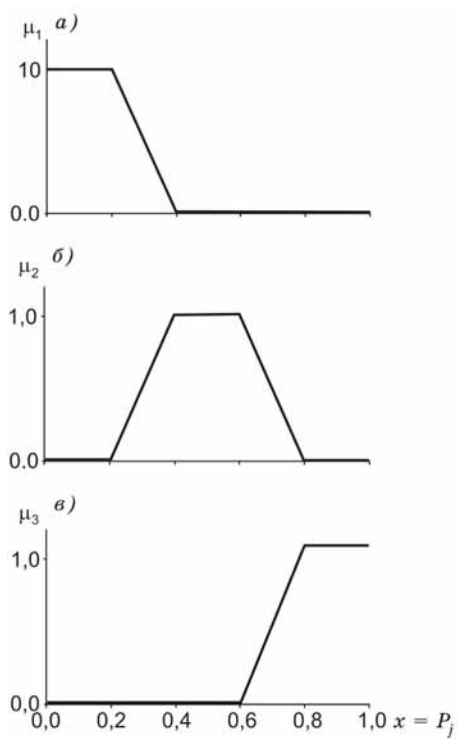


Рис. 2. Функция принадлежности μ_1 , μ_2 и μ_3 .
a — низкий уровень риска, *б* — средний, *в* — высокий.

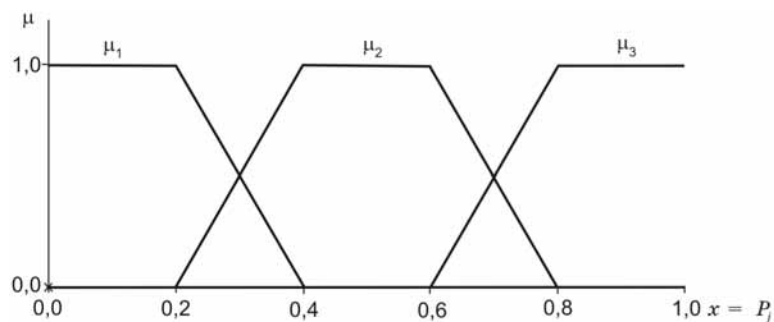


Рис. 3. Комплексная функция принадлежности.

3. Определение комплексного риска

График, представленный на рис. 3, служит для расчета комплексного риска выхода средней месячной температуры воздуха за 80 %-ную квантиль. По каждой из пяти частей ряда определяются значения функций принадлежности трех лингвистических переменных: μ_1 , μ_2 и μ_3 .

Результаты заносятся в таблицу. В качестве примера в табл. 1 приведены данные для средней месячной температуры воздуха в январе на станции Санкт-Петербург.

Таблица 1

Матрица комплексного риска

Номер ряда	P_j	d_j	Функции принадлежности		
			μ_1	μ_2	μ_3
1	0,1905	0,3517	1	0	0
2	0,2850	0,2639	0,5	0,5	0
3	0,4286	0,1744	0	1	0
4	0,7619	0,1072	0	0,5	0,5
5	0,9999	0,1022	0	0	1
α_j			0,2	0,5	0,8

Используя результаты, представленные в таблице, получим значение комплексного риска CR превышения средней месячной температурой воздуха, квантили $t_{80\%}$ в рассматриваемом 100-летнем ряду по формуле свертки:

$$CR = \sum_{i=1}^5 d_i \sum_{j=1}^3 \alpha_j \mu_{ij}(x_i), \quad (4)$$

где d_i — нормированная величина отклонения модулей от $x_{80\%}$; α_j — весовые коэффициенты, равные значениям величины отклонения от $t_{80\%}$ в узловых точках 0,2; 0,5; 0,8.

Полученное значение $CR = 0,52$ показывает уровень риска изменчивости средней месячной температуры воздуха (появления редких значений средней месячной температуры воздуха в отдельные годы).

На втором этапе исследования исходный ряд удлиняется на 20 лет за счет дополнения его данными модельных расчетов на этот период.

Полагая тренд месячной температуры воздуха в ближайшие 20 лет линейным, а среднее квадратическое отклонение в данной части ряда неизменным по сравнению с σ всего 100-летнего ряда, рассчитываем методом Парето вероятности отклонения температуры воздуха от тренда, а затем вероятность выхода этих отклонений за 80 %-ную квантиль.

От исходного ряда отсекаются данные за первое двадцатилетие. Таким образом создается новый 100-летний ряд, включающий прогнозируемое двадцатилетие.

Вся процедура расчетов повторяется по вновь образованному ряду вплоть до вычисления CR^* .

В нашем примере во втором случае $CR^* = 0,57$.

Для принятия решения о приемлемости модельного расчета средней месячной температуры воздуха на будущее двадцатилетие сравним CR и CR^* между собой:

$$|CR - CR^*| = 0,05.$$

Полученный результат не позволяет сделать однозначный вывод о принадлежности риска к той или иной категории. Если бы значение комплексного риска попало, например, в интервал от 0,2 до 0,4, то можно было бы с разной степенью уверенности идентифицировать риск как низкий или средний. Чем ближе значение комплексного риска к той или иной границе интервала (0,2 или 0,4), с тем большей уверенностью его можно отнести к данной категории.

Шкала для определения уровня комплексного риска приведена в табл. 2.

В рассматриваемом случае уровень риска превышения температурой воздуха 80 %-ной квантили низкий с уверенностью, равной единице.

Результаты расчетов разностей рисков, выполненных для всех месяцев года для станции Санкт-Петербург, представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что средняя месячная температура воздуха, полученная по ансамблю моделей для всех месяцев, кроме февраля, марта и ноября, может использоваться в практических

Таблица 2

Шкала для определения уровня комплексного риска

Интервал значений	Уровень риска R	Степень оценочной уверенности
0,8—1,0	Высокий	1
0,6—0,8	Высокий Средний	$\mu_3 = 1 - \mu_2$ $\mu_2 = 5(0,8 - R)$
0,4—0,6	Средний	1
0,2—0,4	Средний Низкий	$1 - \mu_2$ $\mu_1 = 5(0,4 - R)$
0—0,2	Низкий	1

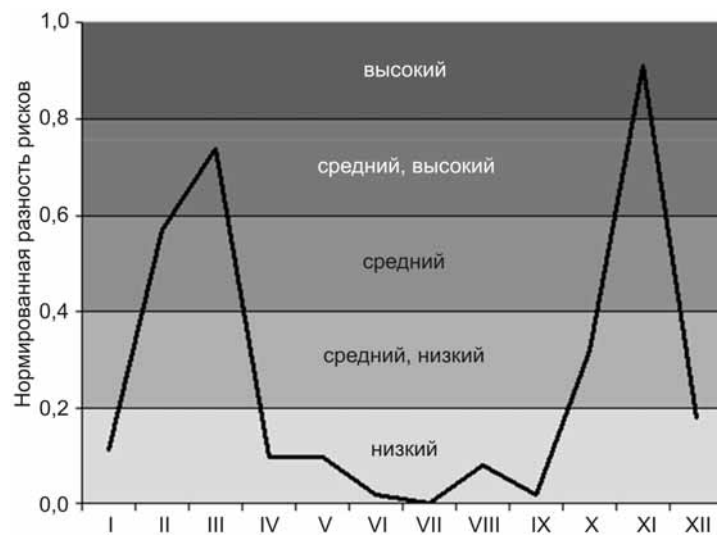


Рис. 4. Нормированная разность и степень уверенности рисков.

расчетах. Риск того, что температура выйдет за 80 %-ную квантиль, низкий с большой степенью уверенности, близкой к единице.

Заключение

Как следует из представленных результатов, в отдельные месяцы риски с полученным уровнем значимости являются неприемлемыми, т. е. прогнозируемые на 20 лет средние месячные значения температуры воздуха не могут использоваться в прикладных исследованиях. В таком случае делается попытка составить прогноз на более короткий срок, например на 10 лет. При этом все расчеты повторяются по ряду, разбитому на десятилетние участки.

В настоящей работе применение нечеткой логики проиллюстрировано на примере одной метеорологической величины — температуры воздуха. При обращении к другим величинам или к их комплексам в решении аналогичных задач данный подход модифицируется с учетом особенностей рассматриваемых величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Левнер Е. В., Птускин А. С., Фридман А. А. (1998). Размытые множества и их применение. — М., ЦЭМИ АН. 108 с.

Математическая энциклопедия. Т. 4 (1984) / Под ред. акад. И. М. Виноградова. — М.: Советская энциклопедия. 608 с.

Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения (1986) / Под ред. Рональда Р. Ягера. — М.: Радио и связь. 495 с.

Zadeh L. A. (1965). Fuzzy sets // Information and Control. V. 8. P. 338—353.

УДК 004.62:551.4

**ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ,
ВКЛЮЧАЕМОЙ В ФОНД ДАННЫХ**

В. М. Шаймарданов

Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации — Мировой центр данных
249039 г. Обнинск, ул. Королева, 6
E-mail: vlad@meteo.ru

Поступила в редакцию 8.06.2011

Продолжительное время качество гидрометеорологической информации поддерживалось на определенном уровне в основном за счет визуального контроля на всех стадиях ее получения и обобщения. Такой контроль требовал кропотливого труда специалистов, и при этом для него были характерны субъективность результатов и ограниченные возможности применения сложных алгоритмов при постоянно возрастающем потоке информации. Применение ЭВМ для обработки данных предоставило дополнительные возможности и положило начало разработке и внедрению автоматических методов контроля. Преимущество автоматического контроля заключается в объективности по отношению к любому элементу информации. К тому же можно производить практически сплошной контроль данных.

Для контроля информации перед записью в роботизированную библиотеку проведен анализ разработанных до настоящего времени методов, алгоритмов и программ. Из них выбраны, адаптированы, частично подправлены и включены в работу наиболее успешно обнаруживающие ошибки. Ниже вкратце рассмотрим основные из них, а также разработанный автором метод мониторинга качества.

Перед формированием архивов, как правило, применяется метод контроля, основанный на проверке данных по абсолютным

предельным значениям. Суть этого метода заключается в следующем.

Если X_1, X_2, \dots, X_n , где n — число наблюдений, являются контролируемыми значениями, то контроль заключается в осуществлении проверки следующего условия:

$$a_{\min} < X_i < a_{\max}.$$

В случае невыполнения условия контролируемое значение считается сомнительным и подвергается анализу специалистов. Граничные значения a_{\min} и a_{\max} представляют собой экстремально возможные значения, за которые не могут (или могут в исключительных случаях) выйти контролируемые элементы. В качестве предельных применяются границы значений изменчивости, полученных по достаточно большому климатологическому ряду наблюдений. Следует отметить, что этот метод применяется для контроля практически любого измеряемого гидрометеорологического элемента.

В первых алгоритмах контроля абсолютные предельные значения выбирались для больших территорий и за большой промежуток времени (многолетний период), т. е. в виде границ колебаний гидрометеорологического элемента в природе. По мере накопления опыта эти значения менялись до границ колебаний элемента для ограниченной территории на заданном отрезке времени либо при тех же условиях в пункте наблюдений.

Автоматический контроль для выявления ошибок можно организовать различными способами. Однако при этом следует учитывать, что разные методы контроля выявляют отдельные типы ошибок, а для обнаружения всех типов ошибок целесообразно строить комплексный контроль. Опишем вкратце в качестве примера варианты контроля метеорологической информации наземных станций и аэрологических данных.

Автоматический контроль *метеорологической информации станций* проводится в два основных этапа, которые должны вы-

полняться последовательно: синтаксический и семантический (Шаймарданов, 1985). Под синтаксическим контролем понимается проверка синтаксической правильности слова (цепочки слов) в языке. С помощью синтаксического контроля проверяется принадлежность слова в конечном алфавите языка, задаваемому грамматикой, совокупность правил которой определяет синтаксис языка. Методы контроля, основанные на использовании смысла информации, относятся к семантическим методам.

Синтаксический контроль должен всегда предшествовать семантическому, так как он позволяет обнаружить грубые ошибки, которые приводят к нарушению структуры данных. В противном случае семантический контроль может оказаться бесполезным. Синтаксический контроль состоит из процедур проверки дискретных значений отдельных элементов на соответствие шифрам и проверки на соответствие описанию данных, т. е. наличие обязательных специальных признаков, групп и блоков.

Следует отметить, что с помощью синтаксического контроля осуществляется проверка информации только с формальной стороны. В основу этого контроля положены методы, базирующиеся на сравнении поступающих в обработку данных с заранее заданными шифрами, знаками и структурами сообщений. Методы синтаксического контроля позволяют эффективно выявлять следующие основные типы ошибок:

- неправильно указано местоположение пункта наблюдений;
- неверны временные характеристики (год, месяц, день, время), нарушена структура блока и группы;
- отсутствуют обязательные блоки;
- присутствуют непредусмотренные блоки или несколько одинаковых;
- присутствуют запрещенные символы и знаки;
- шифры обозначения элементов не соответствуют заданным;
- значения элементов не помещаются в отведенное для записи поле и т. д.

Применяемые методы слабо выявляют смысловые ошибки.

Семантический контроль включает смысловую проверку данных и учитывает специфику полей контролируемых элементов и встречающихся ошибок.

По характеру упорядочения данных семантический контроль текущей метеорологической информации можно подразделить на два основных: внутростанционный, когда контролируются данные пункта наблюдений в отдельности, и пространственный, когда контролируется информация одного пункта наблюдений путем привлечения данных определенного числа окружающих.

Внутростанционный контроль позволяет выявить в основном случайные грубые ошибки данных за отдельные сроки. При этом виде контроля используются значения нескольких метеорологических величин за один срок или одной метеорологической величины за несколько сроков.

Контроль, основанный на использовании различных связей, который для краткости будем в дальнейшем называть логическим, возможен в основном благодаря избыточности информации и наличию связей явлений в природе. Процедура логического контроля заключается в сопоставлении характеристик одной и той же метеорологической величины либо значений различных величин в один и тот же срок наблюдения.

Представим этот метод в общем виде следующим образом. Пусть a_1, a_2, \dots — метеорологические величины одного срока наблюдений на одной станции. Для каждой контролируемой метеорологической величины a_j строятся логические операторы, параметрами которых являются подмножества метеорологических величин этого же срока наблюдений a_i ($i = 1, \dots, n$) (обычно $a_j \in \{a_i\}$).

Введем подмножество S_1 бракованных и S_2 небракованных величин. Тогда выполнение логического оператора равносильно введению характеристической функции

$$e(\alpha_j) = \begin{cases} 0, & \text{если } \alpha_j \in S_2, \\ 1, & \text{если } \alpha_j \in S_1. \end{cases}$$

Таким образом, логический контроль заключается в проверке логических операторов, которые описывают связи между различными метеорологическими величинами. При этом условие проверки формулируется как единственно возможное сочетание значений метеорологических величин. Нарушение считается следствием наличия ошибок, а для локализации ошибки требуется привлечение дополнительных критериев.

Для контроля метеорологической информации создано большое число сочетаний, которые были разработаны ранее и охватывают почти все элементы (Шаймарданов, 1985).

Ввиду того что текущая метеорологическая информация есть результат ежедневных наблюдений до восьми раз в сутки, то для большинства элементов можно иметь временные ряды значений. Наличие рядов позволяет для контроля применять статистические методы. Статистические методы обнаружения грубых ошибок в данных основываются на следующих предпосылках: контролируемые данные рассматриваются как значения случайной величины, имеющей известный закон распределения; маловероятное событие в выборках малого объема произойти не может (принцип практической невозможности).

На основании изложенных предпосылок во ВНИИГМИ—МЦД был создан статистический метод контроля метеорологической информации (Пуголовкин, Степаненко, 1990).

Для получения высококачественных данных в фонде, наряду с созданием методов обнаружения случайных ошибок, актуальной является задача разработки методов выявления систематических ошибок. Наличие на технических носителях информации за продолжительный период времени по большой территории позволяет решить эту задачу. К настоящему времени разработан статистический метод обнаружения систематических ошибок, в основе которого лежит анализ невязок пространственно-временного согласования среднемесячных значений данных одной станции, описанный выше. Другой метод заключается в использовании кусочно-линейной аппроксимации полей анализи-

руемых элементов по группе из пяти-шести станций (Беспалов, Светлова, 1980). Для каждой станции закрепляются определенные влияющие станции, по данным которых строится аппроксимирующий полином. Мерой достоверности данных контролируемой станции служит разность между значением полинома в точке с координатами этой станции и измеренным на ней значением элемента. Если эта разность не превышает некоторое определенное значение, то и измеренное значение признается правильным; в противном случае фактическое значение считается сомнительным и проводится дополнительный анализ. Установленные допуски на величину этой разности позволяют обнаруживать систематические ошибки информации.

Как показал опыт использования перечисленных способов контроля при эксплуатации автоматизированной системы сбора, контроля и обработки метеорологической информации, каждый из них в отдельности обладает различной эффективностью. Организация комплексного контроля позволяет обнаруживать большинство ошибок, появляющихся на разных этапах подготовки и обработки данных, и тем самым достигается желаемый результат. В настоящее время комплексный контроль полученной на станциях метеорологической информации осуществляется по описанной схеме в процессе автоматизированной обработки.

Анализ результатов контроля показывает, что разработанные методы позволяют для большинства метеорологических элементов выявлять ошибки с достоверностью более 90 %. При этом выявлены, например, следующие предельные ошибки контроля:

атмосферное давление — 3 гПа,
температура воздуха и точки росы — 8 °С,
скорость ветра в срок — 7 м/с и т. д.

Такие значения являются вполне удовлетворительными.

Для *контроля аэрологических данных* также применяется следующая схема комплексного контроля качества (Алдухов, 1984; Алдухов, Багров, 2002):

1) климатический контроль, когда наблюдаемое значение сравнивается со средним/климатическим значением;

2) вертикальный контроль, когда наблюдаемое на данном уровне значение сравнивается с результатом вертикальной интерполяции с двух (нижнего и верхнего) соседних уровней на этой же станции в данный срок наблюдения;

3) временной контроль, когда наблюдаемое на данном уровне в данный срок значение сравнивается с результатом временной интерполяции с двух (предшествующего и последующего) сроков наблюдения на этой же станции;

4) горизонтальный контроль, когда наблюдаемое на данном уровне в данный срок значение сравнивается с результатом горизонтальной интерполяции значений некоторого числа соседних станций на этом же уровне и в этот же срок;

5) для геопотенциальной высоты и температуры одним из мощнейших является гидростатический контроль, который проверяет выполнение уравнения гидростатики атмосферы для соседних уровней данной станции в данный срок наблюдения.

Необходимые численные параметры для проведения вертикального, временного и горизонтального контроля (методы 2—4) для каждого контролируемого значения вычисляются предварительно с использованием рассчитанной ранее статистической структуры (многолетние средние месячные значения, стандартные отклонения, вертикальные, временные и горизонтальные корреляции) для каждого уровня и в зависимости от географического расположения данной станции.

Для метода 5 (гидростатика) параметры фиксированы заранее для всех станций и сроков наблюдения.

После вычисления всех действительных и допустимых невязок начинается наиболее ответственный и логически непростой этап комплексного контроля — *алгоритм принятия решения* (АПР) о правильности или ошибочности каждого наблюдаемого значения на основе совместного анализа невязок всех перечисленных методов контроля.

Если же хотя бы одно из проверяемых условий не выполняется, то контролируемое значение автоматически переходит в разряд сомнительных и начинается совместный анализ действительных невязок с учетом их величины и знаков:

а) действительно ли это значение ошибочное?

б) не является ли это значение просто экстремальным для данного метода контроля?

в) не обусловлена ли большая величина данной невязки ошибками в данных соседних по вертикали, времени и горизонтали наблюдений, которые использовались при интерполяции в данную точку и исказили действительную невязку для данного наблюдаемого значения.

Например, если невязки близки по величине и имеют одинаковый знак, то это второй простой случай: да, это наблюдение имеет ошибку, близкую к среднему значению невязок.

Если же невязки меняются, то анализ становится все более сложным.

Такой совместный АПР позволяет детектировать даже небольшие по величине ошибки и не принимать ложных решений из-за ошибок в данных соседних наблюдений.

Следует отметить, что одним из вариантов решения проблемы «смыслового» контроля качества метеорологических данных является комплексный подход, при котором одновременно используются метеорологические (наземные и судовые) и другие виды данных одного пункта наблюдения и нескольких.

Система контроля, построенная на основе реализации двух ступеней — внутростанционного и межстанционного контроля, как показал опыт ее применения, обеспечивает обнаружение как отдельных случайных ошибок, так и систематических искажений в результатах наблюдений.

Остановимся на вновь разработанном методе мониторинга качества, который применен при записи данных в роботизированную библиотеку. Поскольку в информационные ресурсы (ИР) включается только документированная информация, то их каче-

ство можно оценивать через качество указанных документов. Рассмотрим метод мониторинга качества, который оценивается соответствием аппаратуры заданным техническим требованиям и соблюдением методики проведения измерений.

Качество документов, составляющих ИР, определяется:

качеством включаемых в документы данных наблюдений, определяемым как степень соответствия технологий проведения наблюдений установленным требованиям;

качеством ведения документов, определяемым как степень полноты заполнения документов, с учетом качества данных наблюдений, включаемых в документ, и возможных отклонений (ошибок) ведения документов (отклонений (ошибок) в данных при заполнении, в том числе пропусков, вызванных или отсутствием данных, или несоблюдением технологий формирования документов и т. п.).

Качество данных наблюдений оценивается в процессе мониторинга окружающей среды, ее загрязнения. Результаты мониторинга — это данные, качество которых оценивается используемой аппаратурой и методикой проведения наблюдений (измерений). В случае соответствия аппаратуры заданным техническим требованиям и соблюдения методики проведения наблюдений (измерений) качество результатов мониторинга будет максимальным (100 %, или единица). Другая крайняя оценка качества (нуль) будет соответствовать данным, которые по каким-либо причинам исключены из результатов наблюдений (измерений), утеряны в процессе переноса на бумажные (электронные) носители, контроля и обработки информации, передачи данных для включения в информационные ресурсы, при записи в автоматизированные системы хранения (АСХ) или включении в архив на бумажных носителях (далее архив). Кроме того, в случае срочных наблюдений нулевое значение качества будут иметь данные наблюдений, которые не были проведены в установленные сроки (случаи отсутствия данных).

Промежуточные оценки (между единицей и нулем) качества наблюдений, внесенных в документ, определяются как степень

их соответствия данным, которые реально отражают фактическое состояние окружающей среды по рассматриваемому виду наблюдений, или, в другой формулировке, как степень доверия к достоверности данных, внесенных в документ. Указанные оценки осуществляются или экспертным путем, или с помощью специально разработанных методик.

Поскольку формирование документов производится в несколько этапов, основные из которых перечислены выше, оценку качества документов целесообразно осуществлять на каждом из этапов по формуле

$$K_{\text{д}} = \sum_{i=1}^n k_i / n, \quad (1)$$

где k_i — значение качества данных (в относительных единицах) в документе (в том числе и с нулевыми значениями при отсутствии данных); $i = 1, 2, \dots, n$; n — количество данных, которое в соответствии с методиками (руководствами) должно быть включено в документ.

Если мониторинг не проведен в установленные сроки, то качество соответствующих документов и данных, которые должны были быть включены в них, будет иметь значение нуль.

Значение качества документа является усредненным значением качества каждого данных, включенных в документ.

Значение качества данных и как следствие качество документов могут уточняться в процессе контроля.

В случае если включаемый в ИР документ формируется по данным других документов, качество данных, переносимых в новый документ, сохраняется.

Если новый документ формируется в результате различных преобразований (расчетов) данных других документов и зависимость между значениями качества исходных и формируемого документов установить сложно, то следует исходить из положения, что среднее значение качества нового документа не превосходит

среднего значения качества исходных документов. Последнее значение принимается как среднее значение качества формируемого документа и соответственно как среднее значение качества каждых данных, входящих в новый документ.

В рассматриваемом варианте значение качества (K'_d) формируемого документа рассчитывается по формуле

$$K'_d = \sum_{s=1}^p K_{ds} / p, \quad (2)$$

где $s = 1, 2, \dots, p$; p — число исходных документов.

Качество ИР, включенных в автоматизированные системы хранения и архив, может уточняться по результатам работ, связанных с анализом информации, проводимым в целях устранения имеющихся недостатков, в том числе и по результатам замечаний, поступающих от потребителей информации. Поэтому для каждого документа, включенного в ИР, необходимо хранить значения качества включенной в него информации или, если это невозможно, то значения качества документа в целом.

Качество ИР ($K_{ИР}$), включенных в автоматизированные системы хранения или архив, оценивается по формуле

$$K_{ИР} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} k_{ij} / \sum_{j=1}^m n_j, \quad (3)$$

где $j = 1, 2, \dots, m$; m — количество документов, которые должны быть включены в ИР, в числе которых документы, не включенные из-за пропущенных сроков наблюдений.

Качество ИР оценивают исходя из требования надежности хранения и отсутствия в них ошибок. Если произошла потеря или обнаружены ошибки, то производится пересчет качества информации по формулам (1) и (2), а потери восстанавливаются.

Приведенная методика позволяет также производить оценку качества данных по отдельным видам информации, периодам формирования ИР и другим показателям.

Полученные оценки качества целесообразно использовать для анализа хода формирования Госфонда и по полученным результатам принимать меры по повышению качества.

Перенос данных в роботизированную библиотеку открывает широкие возможности для организации контроля качества информации за счет включения дополнительного объема данных. Поскольку для организации контроля имеются данные за продолжительный период, можно применять статистические методы. За счет использования данных о большом числе различных гидрометеорологических элементов по обширной территории — как наземной, так и акватории Мирового океана — можно создать новые методы комплексного контроля и усовершенствовать существующие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алдухов О. А. (1984). Комплексный контроль геопотенциала и температуры в архивах аэрологической информации // Труды ВНИИГМИ—МЦД. Вып. 115. С. 34—63.

Алдухов О. А., Багров А. Н., Гордин В. А. (2002). Статистические характеристики прогностических метеорологических полей и их использование для объективного анализа // Метеорология и гидрология. № 10. С. 18—33.

Беспалов Д. П., Светлова Т. П. (1980). Научно-методические основы построения системы контроля режимной метеорологической информации // Труды ГГО. Вып. 435. С. 3—9.

Пуголовкин В. В., Степаненко С. Р. (1990). Методические основы построения внутростанционного контроля метеорологической информации // Труды ВНИИГМИ—МЦД. Вып. 155. С. 61—71.

Шаймарданов М. З. (1985). Комплексный автоматический контроль текущей метеорологической информации // Труды ВНИИГМИ—МЦД. Вып. 111. С. 35—40.

УДК 551.521.31

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АКТИНОМЕТРИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ В МИРОВОМ ЦЕНТРЕ РАДИАЦИОННЫХ
ДАННЫХ**

Е. А. Самукова, Н. И. Смирнова

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

Поступила в редакцию 1.07.2011
Поступила после доработки 23.08 2011

Введение

Солнечная радиация, поступающая на земную поверхность, в значительной степени определяет термические условия и циркуляцию атмосферы. Достоверные результаты актинометрических наблюдений имеют большое значение в исследовании процессов формирования климата в настоящем и его изменений в прошлом и будущем.

Точность и качество наблюдений за солнечной радиацией во многом определяются характеристиками используемых приборов. Некоторые ошибки в значениях радиации могут быть связаны с проблемами, возникающими при эксплуатации средств измерений: нарушением горизонтальности установки приемной поверхности, нарушением ориентировки теневого кольца пиранометра, покрытием колпака пиранометра пылью, снегом, инеем, запотеванием изнутри трубки пиргелиометра или колпака пиранометра, тенью от зданий и древесной растительности и т. д. (Наставления, 1997; Younes et al., 2005). Ошибки другой категории возникают при обработке и форматировании результатов измерений. Выявление ошибочных значений является целью контроля качества актинометрических данных.

Контроль качества данных по солнечной радиации осуществляется на станциях актинометрической сети, в национальных и региональных центрах сбора информации, в Мировом центре радиационных данных (WMO, 1984; WMO, 2008). Проведение дополнительного контроля качества в МЦРД обусловлено тем, что национальные метеорологические службы не всегда проводят необходимый и достаточный контроль актинометрической информации. Кроме того, как показывает практика, некоторые ошибочные значения могут появиться при подготовке и форматировании данных для передачи в МЦРД.

При выполнении контроля качества в МЦРД используются как методы, применяемые в международной практике, так и алгоритмы, разработанные сотрудниками центра (WMO, 1987; Цветков, 1999). Реализуемые ранее в центре методы контроля были ориентированы в основном на выявление грубых ошибок в суточных значениях радиации и на оценку достоверности их средних за месяц значений (Дворкина, 1980; Морозова, Мясников, 1993). Модернизация вычислительных средств и программного обеспечения, проведенная в МЦРД в последнее время, значительное увеличение архива радиационных данных вследствие накопления актинометрической информации за прошедшие годы и расширения числа радиационных параметров, предоставляемых НМС, позволили разработать процедуры контроля часовых и суточных значений радиации, использовать более точные расчеты физически допустимых пределов солнечной радиации. Увеличение длины радиационных рядов, имеющих в архиве МЦРД, сделало возможным проведение анализа их однородности статистическими методами (Самукова, Цветков, 2010).

В настоящей работе описываются методы контроля и признаки качества суммарной, рассеянной и прямой радиации, используемые в МЦРД в настоящее время, представлены результаты контроля качества радиационных данных за 2009 г.

Методы контроля

Контроль качества актинометрических наблюдений основывается на физических закономерностях, которые определяют зависимости между радиационными и метеорологическими параметрами. При оценке радиационных величин учитывается также их пространственно-временная изменчивость.

В соответствии с руководящими документами ВМО (WMO, 1993; WMO, 2008) в МЦРД при контроле актинометрических данных выполняются:

- проверка превышений физически допустимых пределов,
- проверка превышений климатически обусловленных пределов,
- проверка согласованности радиационных параметров между собой и с метеорологическими элементами,
- проверка пространственно-временной согласованности.

Контроль качества данных о солнечной радиации осуществляется последовательно в три этапа. На первом этапе анализируются часовые суммы радиации, затем оцениваются суточные и месячные значения. На всех этапах проверки достоверности данных информация одновременно выводится и на монитор ПК в графическом виде, и в формируемый программой протокол. Алгоритмы контроля качества реализованы сотрудниками Центра в виде программ, написанных на языке FORTRAN.

Физически допустимым верхним пределом для солнечной радиации, измеренной на земной поверхности, является радиация на верхней границе атмосферы (Миланкович, 1939). Значение радиации на верхней границе атмосферы определяется как функция солнечной постоянной (G_{sc}), фактора коррекции эксцентриситета земной орбиты (E_0), географической широты станции (φ), склонения Солнца (δ) и часового угла в момент наблюдения (τ):

$$G_0 = (1/\pi)G_{sc}E_0(\cos\varphi \cos\delta \sin\tau + (\pi/180)\sin\varphi \sin\delta \tau). \quad (1)$$

Фактор коррекции эксцентриситета (E_0) и склонение Солнца (δ) рассчитываются по следующим формулам (Spencer, 1971):

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221 \cos \Theta + 0,00128 \sin \Theta + \\ + 0,000719 \cos 2\Theta + 0,000077 \sin 2\Theta, \quad (2)$$

$$\delta = (180/\pi)(0,006918 - 0,399912 \cos \Theta + 0,070257 \sin \Theta - \\ - 0,006758 \cos 2\Theta + 0,000907 \sin 2\Theta - \\ - 0,002697 \cos 3\Theta + 0,00148 \sin 3\Theta), \quad (3)$$

где $\Theta = 2\pi(n - 1)/365$, n — число дней года начиная с 1 января.

Значения часового угла (τ) определяется из уравнения

$$\cos \tau = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta. \quad (4)$$

Если значения солнечной радиации, измеренной на актинометрической станции, превосходят значения радиации на верхней границе атмосферы, они считаются ошибочными; исключение составляют значения солнечной радиации в зимние месяцы на станциях в высоких широтах. Измеренные значения радиации в высоких широтах могут превосходить астрономически возможные значения вследствие рефракции и отражения от снега и облаков.

Экстремальные значения солнечной радиации оцениваются различными физико-статистическими моделями, позволяющими рассчитать значения радиации в условиях безоблачного неба (Geiger et al., 2002; Younes et al., 2005). В этих моделях, как правило, учитываются факторы, определяющие ослабление радиации и влияющие на прозрачность атмосферы. Эти факторы меняются в зависимости от времени года и географического положения места. МЦРД не располагает информацией об этих параметрах на станциях мировой сети и поэтому использует для анализа экстремальных значений алгоритмы статистических оценок рядов актинометрических данных (Цветков, Самукова, 1996).

В качестве верхнего климатически обусловленного предела используется 95 %-ный вероятностный уровень относительных максимальных суточных значений радиации G_{\max}/G_0 , если в архиве МЦРД имеются значения радиации, измеренные на станции за 15 лет и более (Цветков, 1999). Вычисление вероятностного уровня производится следующим образом. Максимальные суточные значения G_{\max} , определенные за весь период наблюдений, нормируются на астрономически возможные значения радиации G_0 , рассчитанные по формуле (1). 95 %-ный уровень определяется по распределению кумулятивных частот G_{\max}/G_0 . Полученные относительные значения $G_{95\% \max}/G_0$ пересчитываются в абсолютные значения $G_{95\% \max}$. Контролируемые значения радиации сравниваются со значениями $G_{95\% \max}$.

Если период наблюдения за солнечной радиацией составляет менее 15 лет, в качестве критерия используется уровень максимальных суточных значений радиации, определенный для географической широты, на которой находится актинометрическая станция (Берлянд, Самукова, 1997). На рис. 1 представлены широтный и вероятностный уровни максимальных суточных значений рассеянной радиации, использованные при контроле рассеянной радиации, измеренной на станции Пальма-де-Мальорка (Испания) в 2009 г. По сообщению НМС Испании высокие значения рассеянной радиации в некоторые дни августа и сентября на этой станции были вызваны повышением содержания аэрозоля в атмосфере и сбоями следящей системы.

Графическое представление суточного, месячного и сезонного хода радиационных элементов позволяет контролировать значения, находящиеся в пределах физико-климатических границ, но вызывающие сомнения при экспертной оценке, например при резком уменьшении рассеяния членов ряда или изменении их уровня (рис. 2).

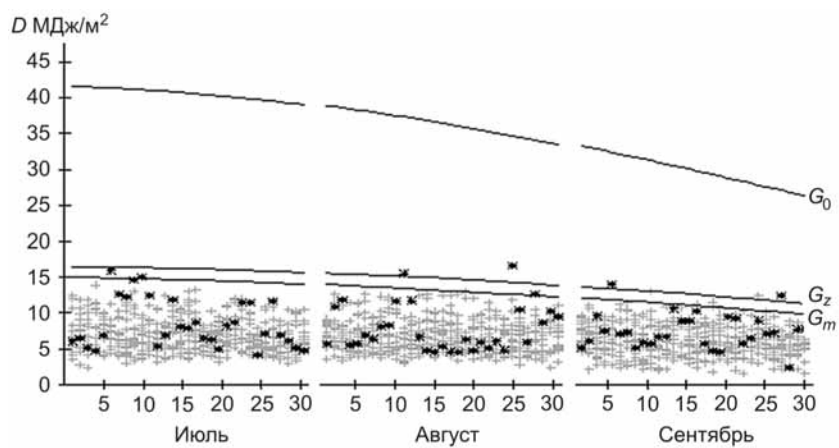


Рис. 1. Суточные суммы рассеянной радиации на станции Пальма-де-Мальорка (Испания) в июле—сентябре 2009 г.

G_z — широтный уровень максимальных значений, G_m — вероятностный уровень максимальных значений.

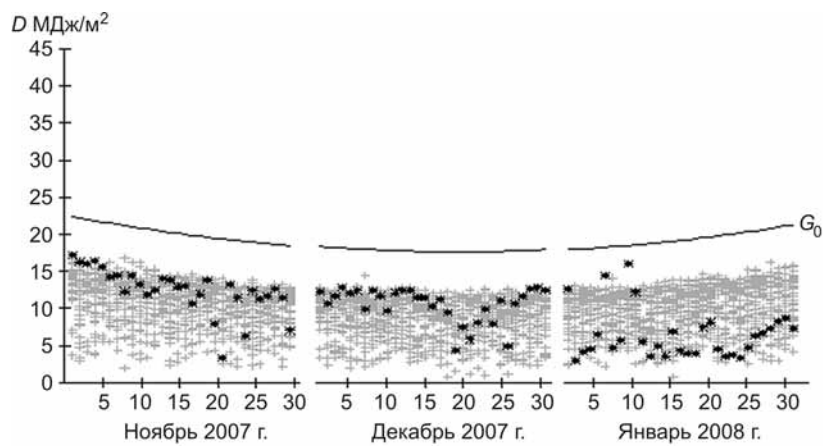


Рис. 2. Суточные суммы суммарной радиации на станции Касабланка (Марокко) в ноябре—декабре 2007 г. и январе 2008 г.

При проведении контроля согласованности оценивается соотношение между прямой, рассеянной и суммарной радиацией, а также зависимость между актинометрическими параметрами и метеорологическими элементами, прежде всего между продолжительностью солнечного сияния и облачностью (Дворкина, 1974; Maxwell et al., 1993; Gilger and Ohmura, 1999). Проведение этого вида контроля в МЦРД ограничено тем, что большинство НМС предоставляют данные только по суммарной радиации и продолжительности солнечного сияния.

Если МЦРД располагает результатами измерения на станции трех параметров — суммарной, рассеянной и прямой радиации, оценивается согласованность значений прямой радиации на горизонтальную поверхность (Ih) с разностью между значениями суммарной (G) и рассеянной (D) радиации (рис. 3).

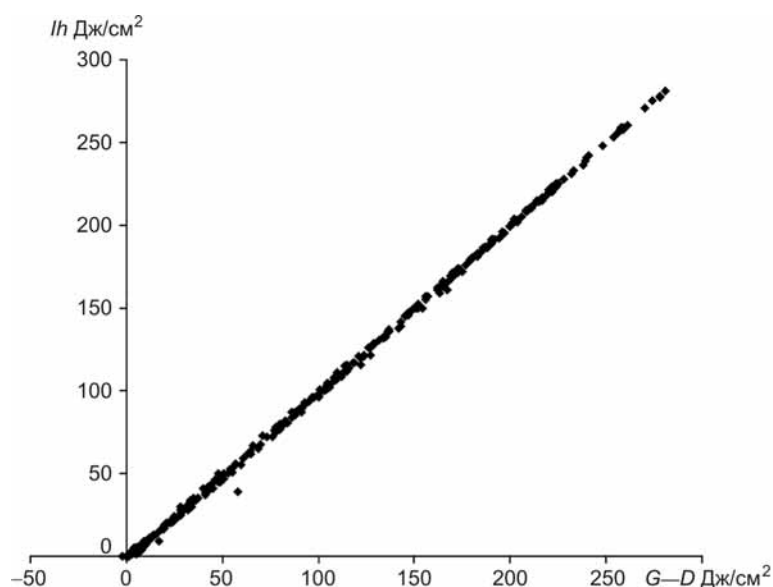


Рис. 3. Зависимость между часовыми значениями прямой радиации (Ih) и разностью суммарной (G) и рассеянной радиации (D) на станции Кишинев (Молдова) в апреле 2009 г.

Если отношение $\Delta G = \frac{G - (D + Ih)}{G}$ оказывается более 0,1, все три значения радиационных параметров признаются сомнительными.

В тех случаях, когда информация о прямой радиации в МЦРД отсутствует, проводится сравнение значений суммарной радиации со значениями рассеянной радиации (рис. 4). Допустимым считается превышение значениями рассеянной радиации значений суммарной радиации в пределах погрешности измерения радиации пиранометром (в среднем на 5 %).

На третьем этапе контроля проводится сопоставление стандартизованных средних за месяц значений суммарной радиации G_{st} с соответствующими значениями продолжительности солнечного сияния SS_{st} при условии, что коэффициент корреляции между этими параметрами превышает 0,7. Значение G_{st} вычисляется по формуле

$$G_{st} = \frac{G - \bar{G}}{\sigma_G}, \quad (5)$$

где G — контролируемое среднее за месяц значение суммарной радиации, \bar{G} — среднее многолетнее значение суммарной радиации за данный месяц, σ_G — среднеквадратическое отклонение среднемесячных значений суммарной радиации.

Значение SS_{st} определяется по формуле

$$SS_{st} = \frac{SS - \bar{SS}}{\sigma_{SS}}, \quad (6)$$

где SS — контролируемое среднее за месяц значение продолжительности солнечного сияния, \bar{SS} — среднее многолетнее значение продолжительности солнечного сияния за данный месяц, σ_G — среднеквадратическое отклонение среднемесячных значений продолжительности солнечного сияния.

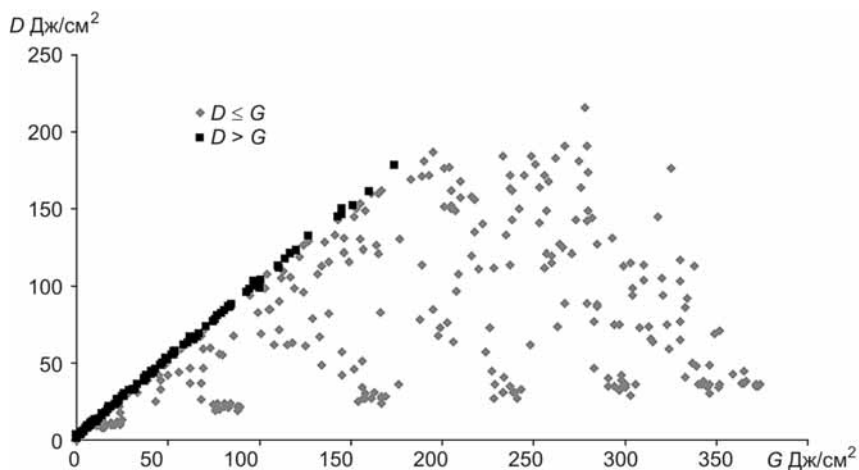


Рис. 4. Зависимость между часовыми значениями суммарной радиации (G) и рассеянной радиации (D) на станции Гудвин-Крик (США) в мае 2009 г.

На рис. 5 а представлен многолетний ход стандартизированных средних за месяц значений суммарной радиации G_{st} и продолжительности солнечного сияния SS_{st} на станции Иль-дю-Левант (Франция) за август. В июле—августе 2010 г. произошло нарушение согласованности между G_{st} и SS_{st} , значение коэффициента корреляции между этими величинами уменьшилось до 0,45.

Сеть актинометрических станций, представленная в МЦРД, в целом довольно редкая. Однако НМС некоторых стран, в частности Франции, Испании и Италии, присылают радиационные данные большого числа станций, что позволяет в отдельных случаях проводить пространственный межстанционный контроль.

Преимуществом МЦРД является возможность использования при контроле информации, полученной от НМС соседних стран.

В случае если значения радиации или продолжительности солнечного сияния представляются сомнительными, для дополнитель-

ного контроля используются соответствующие значения, измеренные на соседних станциях, если коэффициент корреляции между этими значениями не менее 0,7.

Значительное отличие средних за месяц значений суммарной радиации на станции Иль-дю-Левант от значений этого параметра на соседних станциях в июле—августе 2010 г. позволило подтвердить сомнительность значений суммарной радиации на этой станции в указанный период (рис. 5 б).

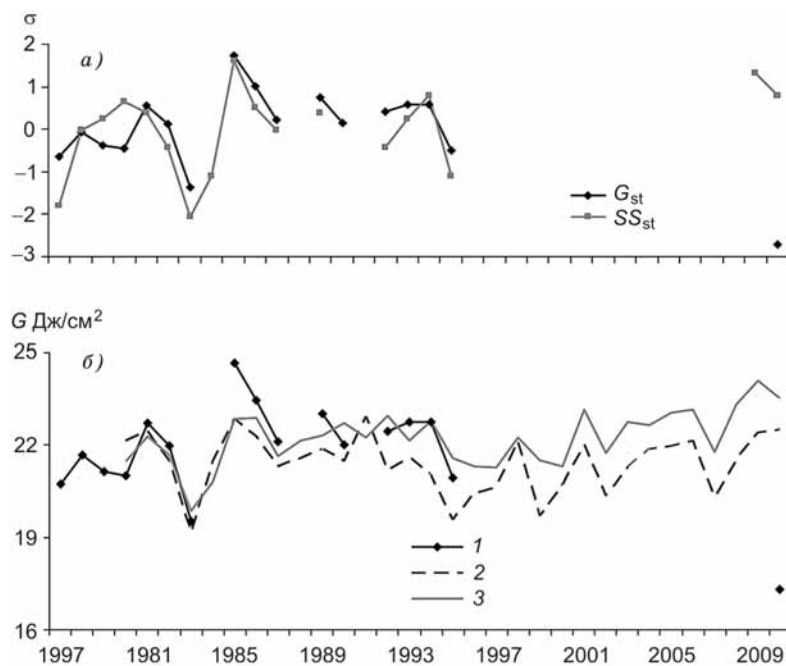


Рис. 5. Многолетний ход стандартизованных средних за месяц значений суммарной радиации G_{st} и продолжительности солнечного сияния SS_{st} в августе на станции Иль-дю-Левант (Франция) (а) и средних за месяц значений суммарной радиации G на станциях Иль-дю-Левант (1), Амбрэн (2) и Мариньян (3) (Франция) в августе (б).

Признаки качества

Развитие методов контроля качества актинометрической информации сопровождается введением новых признаков качества. С одной стороны, необходимость изменения системы признаков качества обусловлена современными международными требованиями, предъявляемыми к специализированной информации, доступной различным пользователям. С другой стороны, целью введения дополнительных к ранее использованным в МЦРД признаков качества является более адекватное их соответствие видам контроля, реализуемым в МЦРД на протяжении последних нескольких лет.

Признаки качества, используемые в МЦРД, отражают, прежде всего, четкое разграничение ответственности между НМС и МЦРД по вопросам контроля данных. Часть из них соответствует оценкам актинометрических данных, осуществляемым в НМС, другие — оценкам МЦРД. Признаки качества показывают, что значение радиационного параметра измерено или рассчитано, и идентифицируют причину отсутствия значения: радиация не измерялась, значение удалено НМС по результатам проведенного контроля или забраковано МЦРД (табл. 1).

В процессе контроля актинометрической информации каждому значению присваивается соответствующий признак качества. На рис. 6 показана последовательность контроля и присвоения признака качества суточным суммам и средним за месяц значениям радиационных величин.

Если величина радиации близка к нулевому значению и при экспертной оценке возникают сомнения в ее достоверности, ей присваивается признак качества 7. Признак 4 соответствует нулевому значению радиации в условиях полярной ночи. В тех случаях, когда значение актинометрического параметра превышает значение радиации на верхней границе атмосферы, ей присваивается признак качества 9.

Таблица 1

Признаки качества актинометрических данных, используемые в МЦРД

Признак качества	Описание
0	Качественное значение
1	Сомнительное значение по оценке НМС
2	Значение отсутствует или забраковано НМС
3	Значение рассчитано или интерполировано НМС
4	Нулевое значение в условиях полярной ночи
5	Сомнительное значение по оценке МЦРД
6	Значение превышает климатический предел
7	Низкое значение по оценке МЦРД
8	Значение рассеянной радиации превышает значение суммарной радиации более чем на 5 %
9	Значение забраковано МЦРД

Значению радиации, которое находится в физически возможных пределах, но превосходит климатически обусловленный уровень, присваивается признак 6. Значение может и не превосходить заданный уровень, но при этом значительно отличаться от значений, измеренных на соседних станциях, или иметь низкую корреляционную зависимость с другими радиационными параметрами или продолжительностью солнечного сияния. В этих случаях по результатам визуального контроля и экспертной оценки сомнительному значению присваивается признак 5.

Если значение рассеянной радиации превышает значение суммарной радиации более чем на 5 % или сумма значений прямой и рассеянной радиации превосходит значение измеренной суммарной радиации более чем на 10 % и нет информации о причинах этих расхождений, значениям всех параметров присваивается признак качества 8. В тех случаях, когда значение какого-либо параметра, кроме того, превосходит физико-климатический предел, оно обозначается признаком 6.

Качественное значение имеет признак 0.

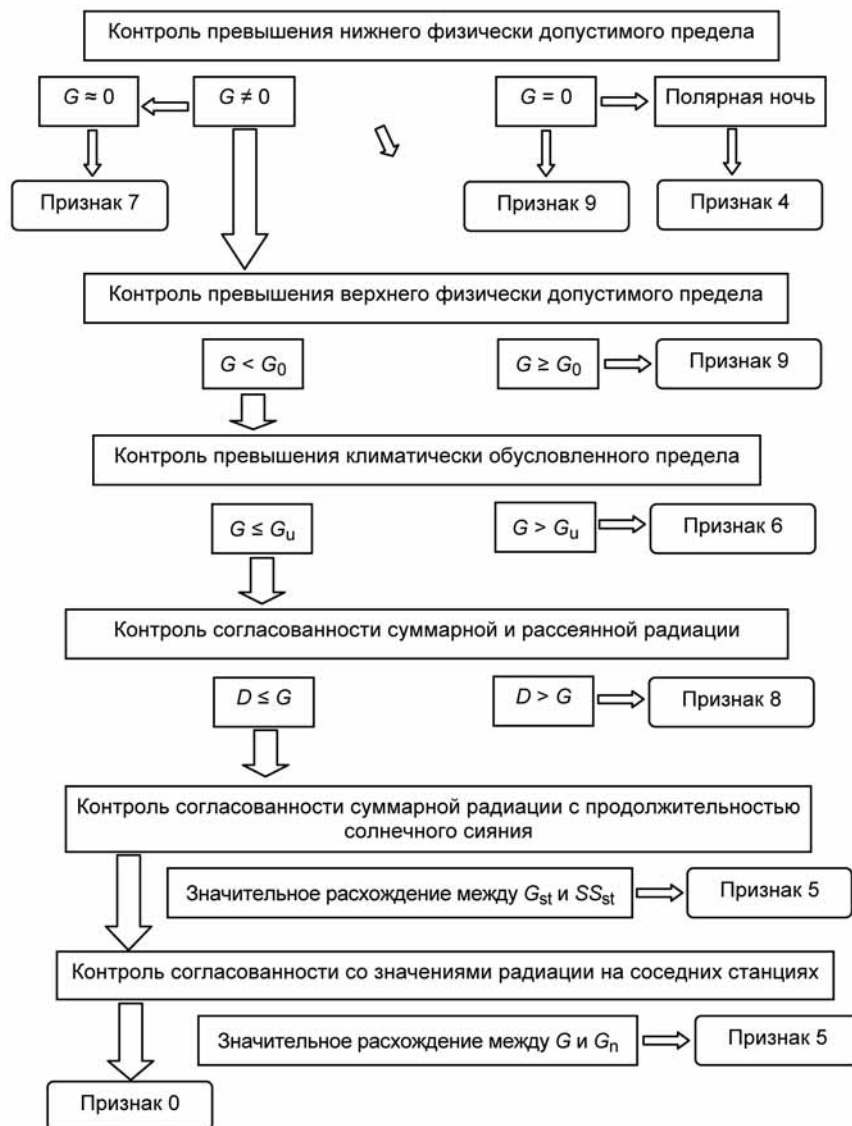


Рис. 6. Контроль качества суммарной и рассеянной радиации и их признаки качества.

Присвоение признаков качества в процессе контроля является предварительным. Окончательно эта операция осуществляется по согласованию с НМС после получения ответов на запросы МЦРД о качестве данных. При отсутствии ответа НМС сотрудники МЦРД принимают решение о признаках качества самостоятельно.

Результаты контроля качества

Важное значение в процессе контроля, проводимого в МЦРД, имеет взаимодействие с НМС стран—участниц обмена актинометрической информацией по вопросам качества предоставляемых данных. Запросы в НМС позволяют восполнить недостаток информации об условиях наблюдений и принять окончательное решение о присвоении того или иного признака качества значениям радиации.

В табл. 2 представлены результаты контроля актинометрических данных за январь—декабрь 2009 г. Радиационные данные за этот период предоставили в МЦРД 460 станций 49 стран:

Период	I—III	IV—VI	VII—IX	X—XII
Число стран	49	49	49	48
Число станций.....	460	437	444	425
Число значений	37290	37856	37444	35144

По результатам проведенного контроля признаки качества, определяющие значения как сомнительные или ошибочные, присвоены менее чем 1 % радиационных значений. После согласования с НМС внесены исправления в некоторые значения прямой, рассеянной и суммарной радиации, поступившей из Австрии, Великобритании, Египта, Португалии, Китая, Японии и других стран. НМС признали значения ошибочными в 20 % случаев обнаружения сомнительных значений по оценке МЦРД. В остальных случаях подтвердили правильность значений, мотивировав их особенностями погодных условий и состояния атмосферы.

Таблица 2

Результаты контроля качества радиационных данных (число присвоенных признаков качества) за январь—декабрь 2009 г.

Признак качества	Месяцы			
	I—III	IV—VI	VII—IX	X—XII
2	17	16	7	10
5	63	94	65	62
6	66	34	64	32
7	24	6	5	16
8	51	52	14	202
9	7	0	6	0
Всего				
число случаев	228	202	161	322
доля, %	0,6	0,5	0,4	0,9

Причинами появления недостоверных значений радиации стали:

- неисправности в измерительных приборах;
- сбои в подаче электричества;
- проблемы с настройкой следящей системы;
- нарушение герметичности пиргелиометра;
- покрытие колпака пиранометра инеем и снегом;
- нарушение ориентировки теневого кольца пиранометра;
- смена прибора и использование переводного множителя прежнего прибора;
- изменение закрытости горизонта;
- ошибки, допущенные в процессе первичной обработки данных наблюдений;
- ошибки, допущенные при передаче информации;
- ошибки форматирования данных для передачи в МЦРД.

В тех случаях, когда ошибки были допущены при обработке данных или проводились параллельные измерения другим при-

бором, неправильные значения были откорректированы НМС, в остальных случаях они были удалены или заменены рассчитанными значениями.

Незначительное число ошибочных и сомнительных значений позволяет сделать вывод, что от большинства НМС в МЦРД поступает достоверная радиометрическая информация высокого качества. Как правило, ошибки имеют случайный, эпизодический характер.

Заключение

Реализуемые в настоящее время в МЦРД методы контроля позволяют достаточно эффективно определять имеющиеся в радиационных данных ошибки. В процессе контроля качества в полной мере используется имеющаяся в архиве МЦРД информация о радиационных и метеорологических параметрах. Использование различных алгоритмов и этапная последовательность процесса отражают системный подход к контролю данных, поступающих в МЦРД.

Существенным аспектом является сотрудничество МЦРД с НМС по проблемам качества актинометрической информации, направленное на устранение или коррекцию ошибочных значений, акцентирование внимания на проблемах, возникающих при измерении и обработке данных.

Расширение архива МЦРД за счет его пополнения часовыми значениями радиации и суточными значениями продолжительности солнечного сияния, возможное использование спутниковой информации и моделей процессов переноса радиации в ближайшее время позволят ввести дополнительные процедуры контроля, что будет способствовать повышению достоверности оперативных и исторических данных, получаемых с мировой актинометрической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берлянд Т. Г., Самукова Е. А. (1997).* Годовой и широтный ход максимальных суточных значений суммарной радиации // *Метеорология и гидрология.* № 3. С. 5—11.
- Дворкина М. Д. (1974).* Авто- и взаимно корреляционные функции полей продолжительности солнечного сияния и суммарной солнечной радиации // *Труды ГГО.* Вып. 307. С. 63—70.
- Дворкина М. Д. (1980).* К вопросу о контроле текущей актинометрической информации мировой сети станций // *Труды ГГО.* Вып. 427. С. 111—121.
- Миланкович М. (1939).* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. — М.: Научно-техническое издательство. 208 с.
- Морозова И. В., Мясников Г. Н. (1993).* Методические основы и программная реализация автоматизированного контроля информации о суммарной солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния, поступающей в Мировой центр радиационных данных // *Метеорология и гидрология.* № 9. С. 105—111.
- Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Актинометрические наблюдения. (1997).* Вып. 5. Ч. 1. — М., Росгидромет. 222 с.
- Самукова Е. А., Цветков А. В. (2010).* Об однородности рядов радиационных данных на станциях мировой актинометрической сети // *Труды ГГО.* Вып. 562. С. 156—169.
- Цветков А. В., Самукова Е. А. (1996).* Оценка суммарной радиации при условии ясного неба по данным мировой наземной сети // *Научная конференция по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнений природной среды. Тезисы докладов.* — М., ВНИИГМИ—МЦД, с. 105—107.
- Цветков А. В. (1999).* Мировой центр радиационных данных: основные направления деятельности / В сб.: *Современные исследования ГГО.* — СПб.: Гидрометеоздат, с. 285—299.
- Geiger M., Diabate L., Menard L., Wald L. (2002).* A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation // *Solar Energy.* V. 73(6). P. 475—480.
- Gilgen H., Ohmura A. (1999).* The global energy balance archive // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* V. 80. P. 831—850.
- Maxwell E., Wilcox S., Rymes M. (1993).* Users manual for SERI QC software, assessing the quality of solar radiation data. Report No. NREL-TP-463-5608. 1617 Cole Boulevard, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Spencer J. W. (1971). Fourier series representation of the position of the Sun // *Search*. V. 2, No. 5. 172 p.

Younes S., Claywell R., Muneer T. (2005). Quality control of solar radiation data: present status and proposed new approaches // *Energy*. V. 30(9). P. 1533—1549.

WMO (1981). Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source. Annex: world maps of relative global radiation // *Technical Note*, No. 172, WMO-No. 557. 298 p. — World Meteorological Organization, Geneva.

WMO (1987). Guidelines on the quality control of data from the world radiometric network / Prepared by the World Radiation Data Centre, Voeikov Main Geophysical Observatory, USSR State Committee for Hydrometeorology // *WCDP-3*, WMO/TD-No.258. 30 p.

WMO (1993). Guide on the global data-processing system // WMO-No.305. — World Meteorological Organization, Geneva.

WMO (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation // WMO-No.8.

УДК 551.52.521

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЕС
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОТВЕДЕНИЯ
ДОЖДЕВЫХ ВОД**

Е. В. Иванова¹, В. Э. Ницис²

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

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 7
E-mail: kobyshnv@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 1.06.2011
Поступила после доработки 7.09.2011

Интенсивность выпадения осадков является одной из наиболее сложных для определения и адекватного прикладного использования характеристик осадков. Это объясняется как недостаточной точностью ее измерения, так и проблемами, связанными с обработкой и преобразованием исходных данных в специализированные показатели.

Информация об интенсивности дождей используется в различных отраслях: дорожном и коммунальном хозяйстве, электроэнергетике, строительном проектировании и т. п. Детальная информация о временной структуре наиболее сильных дождей в настоящее время приобретает все большее практическое значение при проектировании систем водоотведения. Это связано как с изменением режима осадков в связи с общим изменением климата, так и с необходимостью разработки новых для российской гидрометслужбы специализированных показателей интенсивности осадков, включенных в зарубежные строительные нормативы. От

точности определения характеристик интенсивности осадков, включаемых в расчетные формулы и схемы, зависит стоимость сооружений, эффективность и безопасность их эксплуатации.

В зарубежных нормативных документах наиболее распространенной формой представления данных об интенсивности дождей является так называемый профиль дождя (Иванова, 2010). Профиль дождя — это графическое представление зависимости между интенсивностью дождя, его продолжительностью и количеством выпавших в течение него осадков. Анализ некоторых характеристик, определяющих эту зависимость в различных регионах РФ, представлен в работе Алексева с соавторами (2000). Однако вследствие наличия большого числа косвенных зависимостей между различными характеристиками осадков они не всегда гарантируют требуемую точность и не обеспечивают в полном объеме получение информации, которая требуется в соответствии с зарубежными стандартами.

В работе Ивановой (2010) был рассмотрен процесс построения эмпирического профиля дождя. Следующим шагом является построение теоретического профиля дождя, который описывает не наблюдаемое, а расчетное распределение интенсивности осадков в течение различных интервалов времени.

Для получения этой характеристики необходимо провести статистическую обработку данных pluвиографа об интенсивности дождей за период наблюдений не менее 30 лет. На первой стадии работы проводится выборка годовых максимумов интенсивности осадков из данных о наиболее сильных (> 10 мм) дождях за интервалы времени 15, 20, 30, 60, 120, 240, 360, 480, 960, 1440 (сутки), 2160, 2880, 4320, 5760, 7200, 8640, 10080 (7 суток) минут. При этом годовой максимум интенсивности, например, за 15 минут выбирается из всех анализируемых дождей независимо от их продолжительности.

В результате для каждого временного интервала создается массив годовых максимумов интенсивности дождей. Затем происходит выбор статистического распределения, позволяющего

наиболее точно определить значения интенсивности осадков для каждого временного интервала, возможные один раз в 2, 5, 20, 30, 100, 200 лет.

Для решения этой задачи была создана программа в Mathcad (10-я версия), позволившая выбрать оптимальное для данной цели общее асимптотическое распределение экстремальных значений, описываемое формулой

$$\Phi(x) = \exp\{-[1 - k(x - \xi)/a]^{1/k}\}, \quad (1)$$

где ξ , k , a — параметры распределения.

Данное распределение было использовано для определения интенсивности осадков за различные временные интервалы с разной повторяемостью. В качестве примера расчета рассмотрим полученные по указанной методике характеристики интенсивности дождей в Санкт-Петербурге за период 1980—2010 гг.

По рассчитанным значениям интенсивности осадков (табл. 1) определяется количество осадков, выпавшее за каждый временной интервал (при этом значения интенсивности осадков в первой колонке умножаются на 15 мин, значения во второй колонке — на 20 и т. д.). В результате формируется табл. 2.

Представленные в табл. 2 суммы осадков служат основой для построения теоретического профиля дождя, характерного для данного района.

Расчеты выполняются по следующей формуле (Mansell, 2003; Kjeldsen, 2007):

$$y = (1 - a^z) / (1 - a), \quad z = x^b, \quad (2)$$

где y — сумма осадков за период времени x , представляющий собой один из фиксированных промежутков в рассматриваемом временном интервале (x обычно принимается равным 1 мин); a и b — эмпирические коэффициенты, зависящие от степени урбанизированности территории и периода года (теплый или холодный). Для Санкт-Петербурга $a = 0,1$, $b = 0,815$.

Таблица 1

Интенсивность осадков (мм/мин) за различные промежутки времени повторяемостью один раз в 2, 5, 20, 30, 100 и 200 лет

Период повторения	Промежутки времени, мин									
	15	20	30	60	120	240	360	480	960	
2 года	0,558	0,451	0,346	0,209	0,110	0,066	0,048	0,037	0,024	
5 лет	0,983	0,800	0,628	0,368	0,196	0,092	0,073	0,061	0,039	
20 лет	1,536	1,255	0,995	0,576	0,308	0,125	0,106	0,094	0,059	
30 лет	1,660	1,357	1,078	0,622	0,333	0,132	0,113	0,104	0,065	
100 лет	2,148	1,760	1,402	0,805	0,432	0,161	0,142	0,131	0,082	
200 лет	2,299	1,884	1,502	0,862	0,462	0,170	0,151	0,146	0,089	

Период повторения	Промежутки времени, мин									
	1440	2160	2880	4320	5760	7200	8640	10080		
2 года	0,019	0,014	0,012	0,009	0,007	0,006	0,005	0,005	0,005	
5 лет	0,032	0,024	0,019	0,014	0,011	0,010	0,008	0,007	0,007	
20 лет	0,048	0,035	0,028	0,021	0,017	0,014	0,012	0,011	0,011	
30 лет	0,051	0,038	0,030	0,022	0,018	0,015	0,013	0,012	0,012	
100 лет	0,059	0,048	0,038	0,028	0,023	0,019	0,017	0,015	0,015	
200 лет	0,070	0,051	0,041	0,030	0,024	0,020	0,018	0,016	0,016	

Таблица 2

Количество осадков (мм), выпадающее за различные промежутки времени, с погоряемостью
один раз в 2, 5, 20, 30, 100 и 200 лет

Период повторения	Промежутки времени, мин									
	15	20	30	60	120	240	360	480	960	
2 года	8,4	9,0	10,4	12,5	13,2	16,0	17,2	17,9	22,9	
5 лет	14,7	16,0	18,8	22,1	23,5	22,0	26,2	29,3	37,7	
20 лет	23,0	25,1	29,9	34,5	36,9	29,9	38,0	45,1	57,0	
30 лет	24,9	27,1	32,3	37,3	39,9	31,7	40,7	49,9	62,0	
100 лет	32,2	35,2	42,1	48,3	51,8	38,6	51,1	62,9	73,8	
200 лет	34,5	37,7	45,1	51,7	55,4	40,8	54,3	70,1	85,1	

Период повторения	Промежутки времени, мин									
	1440	2160	2880	4320	5760	7200	8640	10080		
2 года	27,9	31,1	33,6	37,4	40,4	42,9	45,0	46,9		
5 лет	46,1	51,0	54,8	60,7	65,3	69,0	72,3	75,1		
20 лет	68,9	76,0	81,4	89,8	96,2	101,5	106,0	110,0		
30 лет	74,0	81,6	87,4	96,3	103,1	108,8	113,6	117,9		
100 лет	84,3	103,4	110,7	121,7	130,2	137,2	143,2	148,4		
200 лет	100,2	110,1	117,8	129,4	138,4	145,8	152,2	157,7		

В результате расчетов по формуле (2) общее количество осадков в каждом из рассматриваемых промежутков времени (15, 20 мин и т. д.) распределяется по времени с заданным шагом (для промежутка времени 15 мин шаг равен 1 мин, для более длительных интервалов он принимается равным 5 или 10 мин). В результате получается теоретическое распределение интенсивности осадков внутри каждого временного интервала (теоретический профиль дождя).

Основная особенность теоретического профиля дождя — это его симметричность, которая, конечно, не наблюдается в реальности. Однако такая форма представления данных об интенсивности позволяет оценить соотношение между средней и максимальной интенсивностью, которая может наблюдаться в этом интервале.

В рассматриваемом примере по данным табл. 2 было построено 17 теоретических профилей для двух значений повторяемости. В качестве примера на рис. 1 представлены теоретические профили дождя за 15-минутный интервал для повторяемости один раз в 2 года и один раз в 20 лет.

Несмотря на схожесть форм графиков, видно, что для разных значений повторяемости максимальная интенсивность существенно различается. Для сравнения на рис. 2 представлены теоретические профили дождя за 960-минутный интервал для повторяемости один раз в 2 года и один раз в 20 лет.

Информация об интенсивности осадков в виде теоретического профиля служит непосредственной основой при проектировании систем отведения дождевых вод. Она используется в расчетах дождевой канализации и учитывается при общем планировании размеров системы водоотведения, так как включает данные о количестве воды, поступающей в течение длительного времени (до семи суток) с наиболее отдаленных участков дренируемой территории.

Предлагаемая методика позволяет повысить надежность определения специализированных показателей интенсивности

осадков и включить их непосредственно в проектные расчеты систем водоотведения в соответствии с нормативными документами, принятыми в Евросоюзе. Она также позволяет уточнить данные, входящие в российские нормативные документы. Так, например, результаты расчетов показали, что максимум суточной суммы осадков 1 %-ной обеспеченности, входящий в табл. 2, с учетом данных последних лет составляет 84 мм, а не 78 мм, как отмечалось в Научно-прикладном справочнике по климату СССР (1980). Интенсивность осадков за 20-минутный интервал оказалась немного выше учитываемой СНиП.04.03—85. «Наружные сети и сооружения» (0,41 мм/мин вместо 0,36 мм/мин).

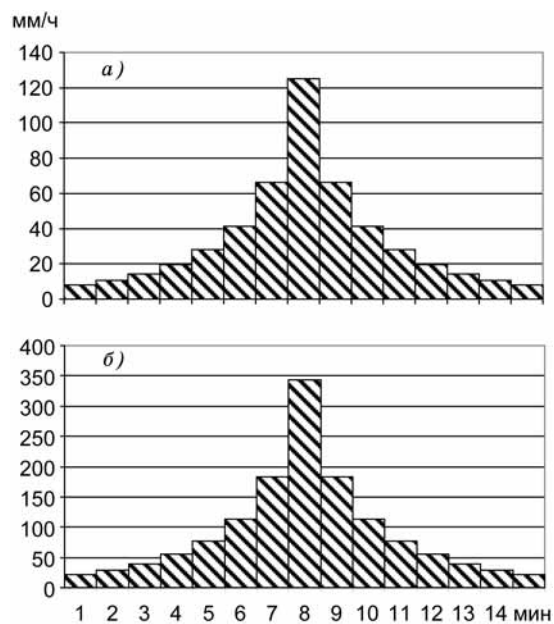


Рис. 1. Теоретические профили интенсивности дождей (мм/ч) за 15-минутный интервал.
a — повторяемость один раз в 2 года, *б* — повторяемость один раз в 20 лет.

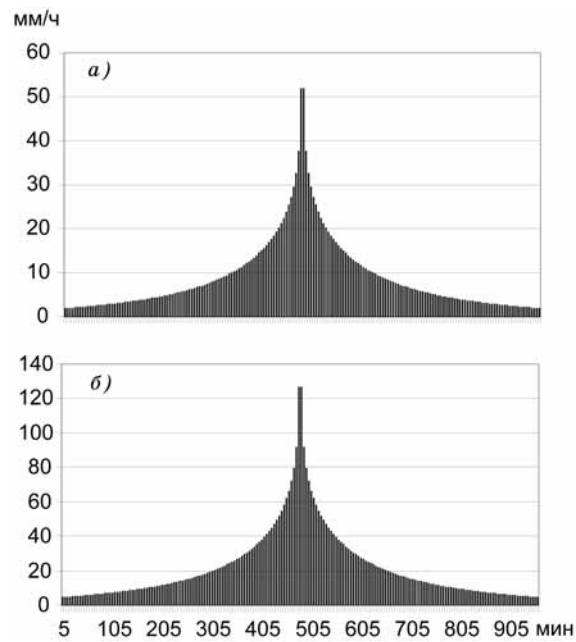


Рис. 2. Теоретические профили интенсивности дождей (мм/ч) за интервал длительностью 960 мин.
a — повторяемость один раз в 2 года, *б* — повторяемость один раз в 20 лет.

Полученные результаты необходимо учитывать при планируемых в ближайшем будущем актуализации российских СНиПов и приведении их в соответствие с нормативными документами ЕС.

Работы по получению теоретических профилей дождя для других пунктов Российской Федерации в настоящее время продолжаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев М. И., Курганов А. М. (2000). Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий. — М.: Изд-во АСВ. 352 с.

Иванова Е. В. (2010). Расчет профиля дождя для проектирования систем водоотведения // Труды ГГО. Вып. 562. С. 118—127.

Научно-прикладной справочник по климату СССР (1980). — Л.: Гидрометеоздат.

СНиП 2.04.03—85 (1986). Наружные сети и сооружения. — М., Гос. комитет по делам строительства.

Martin G. Mansell (2003). Rural and urban hydrology. — London: Thomas Telford Ltd., p. 411.

Thomas R. Kjeldsen (2007). Flood estimation handbook / Supplementary Report No. 1. The revitalized FSR/FEH rainfall-runoff method. — Centre for Ecology & Hydrology. Wallingford, Oxfordshire, UK, p. 80.

УДК 551.006.92 (47+57)

**ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
И ТРЕБОВАНИЙ К МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ
В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Т. П. Светлова

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

Поступила в редакцию 21.07.2011
Поступила после доработки 1.09.2011

Правовые основы деятельности Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета) определяются Федеральным законом от 19 июля 1998 г. № 113-ФЗ «О гидрометеорологической службе» (с изменениями), статья 10 которого обязывает участников деятельности, помимо соблюдения законодательства Российской Федерации в области обеспечения единства измерений, соблюдать при проведении наблюдений за состоянием окружающей среды еще и специальные требования, установленные Росгидрометом.

Основным документом, регламентирующим эти специальные требования, являются периодически обновляемые документы Всемирной метеорологической организации (ВМО), членом которой с 1947 г. является Россия.

Одной из целей ВМО является содействие стандартизации метеорологических наблюдений, для чего ВМО время от времени обновляет Технический регламент, которым странам—членам ВМО предписываются процедуры и порядок метеорологических измерений, дополняемые Руководствами и Наставлениями по практике проведения метеорологических наблюдений (измерений) национальными гидрометеорологическими службами (НГМС).

В частности, в настоящее время введено в действие уже седьмое издание Руководства (ВМО, 2008), которое является основой для подготовки национальных вариантов Наставлений той или иной НГМС в соответствии с собственными потребностями в необходимой информации для гидрометеорологического обеспечения государства.

В Росгидромете таким национальным документом, устанавливающим основные принципы организации и методы производства метеорологических наблюдений на государственной наблюдательной сети, являются Наставления, действующие в настоящее время (Наставление, 1985) и более поздние (Изменение № 1, 1997; Изменение № 2, 2002), разработанные ГГО, головным НИУ по метеорологическим наблюдениям.

Приведенные в упомянутых документах правила производства наблюдений (измерений) призваны обеспечить получение результатов наблюдений, отвечающих стандартам точности, качества, однородности наблюдений по месту и времени, а также требованиям сохранения рядов климатических данных, установленным ВМО для Глобальной системы наблюдений (ВМО, 1981).

Основным документом, определяющим собственные потребности РФ в гидрометеорологическом обеспечении отраслей народного хозяйства и службы прогнозов, является фундаментальный сборник (Петросянц и др., 1975), подготовленный специально созданной комиссией специалистов НИУ Росгидромета.

Методические требования к метеорологической информации, в том числе требования по оптимальным условиям получения информации в натуральных условиях окружающей среды, сформулированы в документах (Русин и др., 1982; Беспалов и др., 1971), являющихся обобщением результатов теоретических и экспериментальных (в том числе экспедиционных) исследований, проводимых ГГО на протяжении последних 50—60 лет XX столетия.

Необходимость таких исследований была вызвана тем, что методические погрешности измерений метеорологических величин в окружающей среде многократно превышают инструмен-

тальные погрешности, регламентированные специальными рекомендациями (Рекомендации, 2000).

Объясняется это тем, что метеорологические наблюдения проводятся в натуральных условиях окружающей среды, когда исключить воздействие окружающей среды на результат измерений невозможно. Более того, не всегда удается установить динамический режим равновесия между средой и чувствительным элементом средства измерений (СИ), а также исключить влияние различных побочных факторов на показания СИ.

Об этом свидетельствуют оценки достоверности результатов метеорологических наблюдений за срок, сутки и месяц (Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР, 1970), полученные (Городецкий и др., 1970) на основании выполненных исследований, перечень которых приведен в списке литературы к указанной работе.

Основным законодательным актом РФ в области метрологии является федеральный закон от 26 июня 2008 г. ФЗ №102 «Об обеспечении единства измерений», устанавливающий правовые основы обеспечения единства измерений в Российской Федерации и направленный на защиту прав и законных интересов граждан и юридических лиц от отрицательных последствий использования недостоверных результатов наблюдений в окружающей среде, важнейших сферах общественной жизни, а также на развитие и совершенствование эталонной базы РФ.

При обеспечении единства измерений на государственной наблюдательной сети используются также рекомендации ВМО в части единства требований к точности измерений основных метеорологических характеристик, периодичности выполнения измерений, методов обработки и представления данных, методик проведения международных сравнений региональных и национальных эталонов, а также эталонных СИ различных разрядов.

Система метрологического обеспечения качества проводимых Росгидрометом измерений основывается на современных технологиях автоматизированного анализа и управления состоянием парков СИ, интеллектуальных методиках поверки и градуировки СИ,

внедрении в оперативную работу организаций наблюдательной сети Росгидромета мобильных эталонных и поверочных средств, обеспечивающих метрологическое обслуживание СИ на местах.

Парадокс заключается в том, что, несмотря на выполненные в последние годы работы по унификации методов наблюдений и СИ, модернизации методов поверки эталонных и рабочих СИ, разработке идеологии автоматизации наблюдательной сети и усвоения информации автоматических станций, до настоящего времени не удается стандартизировать понятие «наблюдение».

Понятие «методика выполнения наблюдений» (МПН) было введено в употребление в нормативных документах ГГО, регламентирующих производство метеорологических наблюдений, по требованию Росстандарта с целью сужения сферы государственного регулирования в области измерений. Стандартизация такого понятия была необходима для регламентации особенностей гидрометеорологических наблюдений, осуществляемых Росгидрометом, чтобы унифицировать особые требования Росгидромета, упомянутые в ст. 10 федерального закона «О гидрометеорологической службе» № 113-ФЗ, поскольку именно Росгидромет является уполномоченным федеральным органом исполнительной власти в области гидрометеорологии и смежных с ней областях.

При производстве наблюдений за состоянием окружающей среды применяются СИ и методики выполнения измерений (МВИ), сертифицированные Росстандартом.

Причина появления особых требований, отражающих вековой опыт наблюдений за окружающей средой, связана с тем, что Росгидромет при наблюдениях (измерениях) вынужден иметь дело с нестандартными (неопределенными) объектами, когда не удается даже сформулировать, что же конкретно является объектом измерения и эталоном измеряемой величины. Примером такого объекта является «нижняя граница облаков», для определения высоты которой используются СИ (дальномеры), вынужденно поверяемые наведением луча СИ на твердую плоскую мишень.

Росстандарт не устанавливает границы погрешностей измерений, не осуществляет поверку подавляющего большинства СИ гидрометеорологического назначения (за исключением газоанализаторов, применяемых при мониторинге загрязнения атмосферы) и не является законодателем в области МВИ в натуральных условиях окружающей среды. Именно по этой причине в соответствии с ГОСТом (ГОСТ, 1996) Росстандарт аккредитовал ведомства права аттестации МВИ разных видов.

В области деятельности Росгидромета такие права переданы НИУ, головным по видам наблюдений, и лишь они могут дать оценку доли влияния методических погрешностей при соответствующих измерениях, а также регламентировать способы уменьшения их влияния на результат наблюдений (измерений).

Последнее относится, прежде всего, к метеорологическим, и особенно агрометеорологическим, наблюдениям, подпадающим в большей своей части под понятие МПН.

Ответственность за разработку нормативных документов, регламентирующих производство метеорологических наблюдений на государственной наблюдательной сети, и контроль соблюдения установленных ими требований в системе Росгидромета возложена на ГГО, специалисты которого осуществляют эту работу на протяжении более 100 лет. В настоящее время ГГО обладает научным потенциалом, опытом и возможностями для обеспечения единства метеорологических измерений и сопоставимости данных, полученных в результате наблюдений на метеорологической сети Росгидромета, с данными наблюдений других государств.

Известно, что на качество метеорологической информации влияют многие факторы, и прежде всего следующие:

требования пользователей;

функциональные и технические спецификации (регламенты ВМО, национальные РД по методам наблюдений, документы на СИ, административные регламенты и др.);

тип используемых СИ с учетом требуемой точности, диапазона, разрешения, условий климата и окружающей среды;

соответствие техническим условиям (контроль действительного качества каждого СИ путем проведения испытаний в рабочих условиях, установленные процедуры внедрения);

совместимость данных, полученных разными СИ, имеющими различные технические характеристики;

местоположение пунктов наблюдений и экспозиция СИ;

инструментальные ошибки (калибровка, поверка, техническое обслуживание);

обработка данных (применение соответствующих процедур дискретизации, осреднения и передачи данных);

контроль данных (своевременность и правильность применяемых процедур оперативного и неоперативного контроля на всех стадиях получения и обработки информации);

подготовка персонала;

полнота и правильность метаданных.

Обеспечение необходимого качества наблюдаемых данных невозможно без разработки системы управления качеством (УК) метеорологических наблюдений, предусматривающей процедуры непрерывного взаимодействия между различными составляющими, включенными в эту систему. При этом система УК не может не предусматривать наличия детальных сведений о системе наблюдений в целом и каждого пункта в отдельности, всех зафиксированных изменений в ней за исторический период, которые и составляют содержание метаданных. Мониторинг функционирования системы УК должен включать в себя проведение регулярных инспекций сети.

Задача системы управления качеством данных состоит в обеспечении получения на государственной наблюдательной сети результатов наблюдений, соответствующих установленным ВМО и Росгидрометом требованиям в отношении точности, разрешения, сопоставимости их с данными наблюдений других государств и

других форматов представления, а также непрерывности, однородности и репрезентативности рядов наблюдений.

Такая система УК должна действовать непрерывно на всех уровнях системы наблюдений как единого целого — от планирования сети до архивации данных — и, кроме того, включать обратную связь для внесения необходимых исправлений в данные, направляемые потребителям и предназначенные для хранения в Государственном фонде данных.

В настоящее время в ряде НГМС проводятся работы по внедрению отдельных элементов системы управления качеством метеорологической информации и обслуживания для отдельных секторов, таких, например, как авиационная метеорология. В связи с этим Комиссия по основным системам (КОС) ВМО на своей внеочередной сессии в декабре 2002 г. отметила, что большому числу НГМС требуется техническое руководство со стороны ВМО для создания своих национальных систем УК, вследствие чего приоритетной задачей является разработка дополнений к Техническому регламенту по системам УК, Руководствам и другим техническим документам ВМО, которые используются НГМС в оперативной практике обслуживания потребителей.

Комиссия также предложила ВМО отнести к приоритетным задачам и подготовку отдельного Руководства (Руководящего материала) по структуре системы УК ВМО с учетом опыта НГМС по созданию собственных систем УК и рекомендовала НГМС включать в систему УК следующие составляющие:

- аттестацию пунктов наблюдений и персонала;
- сертификацию и поверку средств измерений, аттестацию оборудования;
- мониторинг функционирования наблюдательной сети, включая СИ;
- оперативный и неоперативный мониторинг качества результатов наблюдений.

В Росгидромете контроль качества результатов метеорологических наблюдений проводится с 70-х годов XX столетия на раз-

ных стадиях получения, обработки и архивации данных (т. е. на станциях, в центрах обработки и в фондах архивации данных). Результаты контроля регулярно поступают организациям (УГМС), управляющим сетью, для принятия необходимых мер, в частности для исправления недостоверных данных.

Следует отметить, что в настоящее время в Росгидромете, в отличие от других НГМС, разработаны и/или введены в действие основные компоненты необходимого комплекса деятельности по созданию системы УЖ:

Методические указания. Общие сертификационные требования к методам определения основных метеорологических величин и пунктам их наблюдений (проект);

Рекомендации. Наземные сетевые средства измерений метеорологического назначения. Общие технические требования (Рекомендации, 2000);

Рекомендации. Автоматизированная система первичной обработки результатов наблюдений и формирования метеорологической информации. Общие требования (проект);

Инструкция. Порядок применения и контроля применения средств измерений, автоматизированных информационно-измерительных систем, оборудования и технологий метеорологического назначения (проект);

Положение о методическом руководстве наблюдениями за состоянием и загрязнением окружающей природной среды. Общие требования (РД 52.04.688.2006).

Современный подход к созданию системы управления качеством результатов наблюдений заключается в налаживании эффективного взаимодействия между всеми участниками системы наблюдений и переходе к оценкам качества данных в соответствии со стандартами ИСО 9000.

В связи с этим большое внимание в настоящее время ГГО уделяет разработке целого ряда документов, регламентирующих процедуру установления и подтверждения соответствия (аттестацию) проверяемого объекта (станции), МВИ, квалификации пер-

сонала наблюдательного подразделения установленным требованиям, с тем чтобы по возможности уменьшить влияние внешних факторов окружающей среды на результат измерения.

Аттестация пунктов наблюдений и персонала наблюдательных подразделений призвана стать одной из составляющих контроля качества наблюдений, так как достоверность получаемых результатов наблюдений, как показывает практика, может быть обеспечена только при регулярной периодической оценке состояния пунктов наблюдений и квалификации персонала.

Сложившаяся к настоящему времени в Росгидромете система обеспечения качества данных включает четыре этапа контроля:

технический и первичный критический (сокращенный);

синтаксический (внутристанционный) в рамках оперативной программы обработки ПЕРСОНА МИС, осуществляемый по данным каждой конкретной станции;

пространственный (межстанционный) как часть ПЕРСОНЫ МИС, осуществляемый по данным группы станций;

контроль данных, помещаемых в Государственный фонд данных.

Эта система обеспечения качества данных предусматривает не только возможность обнаружения недостатков в контролируемых данных, но и своевременное реагирование на них специалистов, имеющих необходимый уровень компетентности. В связи с этим разработка и внедрение унифицированных РД приобретает особое значение и является решающей составляющей современного подхода к системе управления качеством данных в Глобальной системе наблюдений.

Тем не менее обеспечение необходимого качества наблюденных данных на метеорологической сети невозможно без унификации и руководящих документов по всем составляющим деятельности Росгидромета. В связи с этим разработка и внедрение унифицированных РД приобретают особое значение и являются решающей составляющей современного подхода к системе управления качеством данных в Глобальной системе наблюдений.

К сожалению, к настоящему времени в Росгидромете введены в действие не все компоненты системы УК, обеспечивающие эффективное функционирование государственной наблюдательной сети. Должны также быть разработаны соответствующие функциональные и технические спецификации.

В рамках решения этой задачи в ГГО разработан проект Рекомендаций по организации и проведению проверки метеорологических наблюдательных подразделений на соответствие требованиям ВМО и Росгидромета. Однако проект указанных Рекомендаций, кроме документа «Рекомендации 2000 г.», необходимой поддержки в Росгидромете по разного рода причинам не получил.

Наблюдаемое частичное ухудшение качества результатов наблюдений на государственной наблюдательной сети в значительной мере обусловлено тем, что земли, отводимые наблюдательным подразделениям Росгидромета под метеорологические площадки и их охранные зоны, Земельным кодексом РФ не отнесены к категории земель особого целевого назначения, находящихся в собственности государства.

Указанное обстоятельство, а также отсутствие необходимых международных стандартов, регламентирующих застройку земельных участков наблюдательных подразделений, вызывающую потерю их репрезентативности, приводит к заметному увеличению погрешности результатов наблюдений, снижая их достоверность и сопоставимость с результатами наблюдений других стран. Это дезориентирует потребителей при использовании результатов наблюдений в научных исследованиях, и особенно при мониторинге климата. Неслучайно оценки тенденций изменения климата, выполняемые различными авторами по разному набору наблюдательных станций, в число которых нередко включаются и станции, потерявшие репрезентативность, заметно различаются.

Представляется, что ВМО необходимо уделить особое внимание созданию международных стандартов в области соответствия

пунктов наблюдений и персонала наблюдательных подразделений требованиям ВМО, которые позволят обеспечить достоверность информации, получаемой с наземных метеорологических станций, а также ее точность во всех без исключения НГМС. Указанные документы необходимы для того, чтобы сохранить стандарты долговременных климатических данных и тем самым обеспечить однородность их рядов в обозримом будущем.

Создание таких стандартов, устанавливающих минимальные размеры земельных участков (акваторий), отводимых для пунктов наблюдений, допускаемую хозяйственную деятельность в охранных зонах метеоплощадок наблюдательных подразделений различных категорий (эталонных, климатических, синоптических), станет необходимым первым шагом при создании системы управления качеством ВМО, а также системы управления качеством наблюдений НГМС, в том числе Росгидромета.

Это тем более важно, что права Росгидромета на использование государственных земель для функционирования государственной наблюдательной сети оказались законодательно не установленными на правительственном уровне, как и административная и уголовная ответственность за нарушения в области их охраны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГОСТ 8.563—96 ГСОЕИ (1996). Методики выполнения измерений.

Изменение № 1 (1985). Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. I. Метеорологические наблюдения на станциях. — СПб: Гидрометеоиздат. 55 с.

Изменение № 2 (2002). Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. I. Метеорологические наблюдения на станциях. — СПб: Гидрометеоиздат. 10 с.

Методические основы автоматизированной системы метеорологических наблюдений (1971) / Под ред. Д. П. Беспалова. — Л.: Гидрометеоиздат, с. 3—35.

Методические требования к информации, получаемой от массовой сети наземных метеорологических и специализированных станций (1982) / Под ред. Н. П. Русина // Труды ГГО. Вып. 463. С. 3—74.

Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР (1970) / Под ред. О. А. Городецкого. — Л.: Гидрометеиздат. 84 с.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам (1985). Вып. 3. Ч. I. Метеорологические наблюдения на станциях. — Л.: Гидрометеиздат. 300 с.

Наставление по глобальной системе наблюдений (1981) // ВМО. № 554.

О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов (1975) / Под ред. М. А. Петросянца и В. Д. Решетова. — Л.: Гидрометеиздат. 214 с.

Рекомендации (2000). Наземные сетевые средства измерений гидрометеорологического назначения. Общие технические требования / Одобрены Межгосударственным советом по гидрометеорологии. Решение № 4.2/12 2000 г. — Душанбе. 35 с.

РД 52.04.688—2006 (2006). Положение о методическом руководстве наблюдениями за состоянием окружающей среды и ее загрязнением. Ч. 1. Метеорологические, актинометрические и теплобалансовые наблюдения. — М.: Метеоагентство Росгидромета.

Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. 7-е изд. (2008) // ВМО. № 8.

УДК 551.508:551.585

**О КОМПЛЕКСНЫХ ОЦЕНКАХ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ ПРИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ЗАГРЯЗНЕНИЯХ ВОЗДУХА**

Б. Л. Кожевников

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

Поступила в редакцию 1.08.2011
Поступила после доработки 18.08.2011

Энтропийная методология оценки качества атмосферных условий, предложенная автором (Кожевников, 2009, 2010а, 2010б), не была опробована для комплексных нагрузок многокомпонентных загрязнений атмосферного воздуха в сочетании с явлениями погоды. Об актуальности таких оценок свидетельствуют негативные ситуации, связанные с наблюдавшимся в 2010 г. в Москве смогом, вызванным торфяными пожарами в Подмосковье. Оценим пригодность одного из способов энтропийной методологии — информационно-статистического метода — для расчета нагрузок при смоге.

Согласно справке (Видимость в аэропортах, 2010) Правительства Москвы, представленной ГПУ «Мосэкомониторинг», первый случай смога был официально зарегистрирован в 10 ч 27 июля 2010 г. При повторном проявлении смога 6 августа 2010 г. (Смог в Москве, 2010) загрязнение воздушного бассейна города характеризовалось превышением обычного уровня концентрации веществ — «индикаторов горения» (угарного газа, двуокиси азота и взвешенных частиц аэрозоля), которое составило: для СО 5,4 ПДК (предельно допустимой концентрации); для NO₂ 2,2 ПДК, для взвешенных частиц 16,0 ПДК. В дальнейшем, 7 августа 2010 г., было отмечено некоторое уменьшение этих значений — до 4,4; 2,1 и

7,6 ПДК соответственно. При этом в аэропортах наличие в воздухе аэрозоля (из дыма, тумана и пыли) привело 7 августа к ухудшению метеорологической оптической дальности видимости (МОД): в а/п Шереметьево до 600 м и менее, в а/п Домодедово до 500 м и менее, в а/п Внуково до 300 м и менее.

Кроме того, согласно справкам обсерватории Михельсона, в течение июля и августа 2010 г. среднесуточная температура воздуха в Москве была повышенной и составляла 35—39 °С.

Оценим нагрузку от смога, наблюдавшегося 7 августа 2010 г., на систему человек—машина, имея в виду, что ПДК — гигиенический норматив влияния условий на человека, и понимая под машиной воздушное судно.

Информационно-статистический метод (ИСМ) рассматривает нарушения нормальных условий атмосферы как сторонний шум, помеху полезным информационным сигналам. В качестве последних выступают нормальные значения параметров атмосферы, определенные, например, ГОСТ 15150—69.

Обозначим через N порядковый номер интервала квантования оси параметра атмосферы, в который попадает результат его измерений. Тогда для 7 августа 2010 г. для трех упомянутых видов загрязнения, характеризующихся среднесуточными значениями интенсивности, можно записать: для СО (4,4 ПДК) $N_1 = 5$, для NO₂ (2,1 ПДК) $N_2 = 3$, для взвешенных частиц (7,6 ПДК) $N_3 = 8$.

В случае введения в исследования координаты времени с дискретностью, равной в единице ($\Delta\tau = 1$ с), появляется возможность представления первого показателя ИСМ в виде скорости производства информационной энтропии $(-q)'$, которая измеряется (на физическом уровне) в битах в секунду (бит/с):

$$(-q)' = \Delta H / \Delta\tau = (k \ln N) / \Delta\tau, \quad (1)$$

где ΔH — информационная энтропия; k — модуль перевода единиц: $k = 1/\ln 2 = 1,4427$ бит/нит.

Подставив значения $N_{1,2,3}$ в формулу (1), получим оценки скорости производства энтропии в сложившихся 7 августа 2010 г. условиях загрязнения атмосферы по перечисленным компонентам загрязнений соответственно: $(-q)'_1 = 2,32$ бит/с; $(-q)'_2 = 1,58$ бит/с; $(-q)'_3 = 3,00$ бит/с.

Энтропийная методология позволяет учесть класс опасности (K) компонентов путем ввода поправочных коэффициентов (A), определяемых по выражению $A = (5 - K)$. Класс опасности для перечисленных компонентов в соответствии с Перечнем (2010) составляет для угарного газа $K_1 = 4$, для двуокиси азота $K_2 = 2$, для взвешенных частиц (код веществ 2907—2909) $K_3 = 3$. Тогда поправочные коэффициенты для них будут равны: $A_1 = 1$, $A_2 = 3$, $A_3 = 2$, а значения скоростей производства энтропии с поправкой на степень опасности загрязняющих веществ составят: $A_1(-q)'_1 = 2,32$ бит/с, $A_2(-q)'_2 = 4,74$ бит/с, $A_3(-q)'_3 = 6,00$ бит/с, а при суммировании действия: $(-q)'_{1...3} = A_1(-q)'_1 + A_2(-q)'_2 + A_3(-q)'_3 = 13,06$ бит/с.

Согласно Авиационным правилам (АП-170, 2003), погрешность измерений МОД на взлетно-посадочной полосе (ВПП) при МОД в интервале 150—500 м находится в пределах ± 50 м, а при МОД более 500 м — в пределах ± 10 %. Принимая во внимание обратную зависимость качества атмосферных условий для взлета и посадки воздушных судов от МОД на ВПП, получаем следующие значения N : 7 августа 2010 г. в а/п Шереметьево для МОД в пределах 540—600 м $N_4 = 2$, в а/п Домодедово (486—540 м) $N_5 = 3$, в а/п Внуково (300—250 м) $N_6 = 5$. Подставив значения $N_{4...6}$ в формулу (1), получим следующие значения дополнительной нагрузки для пилотов при взлете и посадке в условиях плохой видимости в смоге 7 августа 2010 г.: $(-q)'_4 \approx 1,00$ бит/с; $(-q)'_5 \approx 1,58$ бит/с; $(-q)'_6 \approx 2,32$ бит/с.

В медицине наиболее комфортными для жизни и деятельности человека считаются условия с температурой окружающего воздуха от 17 до 25 °С, обеспечивающие оптимальное протекание его биохимических процессов. Вследствие этого и в технике сходные температурные интервалы определены государственными стандартами как нормальные. Выход параметра атмосферы за пределы этого интервала является нарушением его нормальности и рассматривается как проявление температурного воздействия климатического фактора (ВКФ). При шаге квантования 7 °С вышеприведенные среднесуточные температуры воздуха (35—39 °С) находятся в четвертом интервале квантования ($N_7 = 4$). Используя формулу (1), получим оценку текущего действия такого температурного ВКФ: $(-q)'_7 \approx 2,00$ бит/с.

Интегрирование скорости производства энтропии, определяемой выражением (1), по времени позволяет получить значение второго показателя информационно-статистического метода, которым является количество произведенного ВКФ информационного шума ($-Q$), дезинформации за выбранный период времени, выражаемое в битах:

$$-Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (-q)' d\tau,$$

или

$$-Q = \sum_{i=1}^n (-q_j)' d\tau; = [(-q_{cp})']\tau, \quad (2)$$

где $\tau = \tau_2 - \tau_1$ — выбранный интервал интегрирования (суммирования) величины $(-q_j)'$, который в нашем случае составляет сутки ($\tau = 24$ ч); $(-q_{cp})'$ — среднесуточное значение величины $(-q)'$, в нашем случае $(-q_{cp})' = (-q)'_{1...7}$.

Подставив в формулу (2) значения $(-q)'_{1...7}$, получим для случая смога в Москве, наблюдавшегося 7 августа 2010 г., следующую суммарную нагрузку от погодных-климатических условий на систему человек—машина: в а/п Шереметьево $(-Q)_{Ш} = [(-q)'_{1...3} + (-q)'_7 + (-q)'_4] 86400 = 1388$ килобит за сутки, в а/п Домодедово $(-Q)_{Д} \approx 1438$ килобит за сутки, в а/п Внуково $(-Q)_{В} = 1502$ килобит за сутки.

Последние три значения почти на порядок превышает среднюю оценку температурного ВКФ $(-Q)_T = 173$ килобит за сутки, характерную для чистой атмосферы, но при повышенной до 25—33 °С температуре воздуха. Оценка $(-Q)_T$ получена с использованием значений $N_7 = 4$, $(-q)'_7 = 2$ бит/с при условии $(-q)'_{1...6} = 0$.

Таким образом, информационно-статистический метод энтропийной методологии позволяет не только рассчитать нагрузки от многокомпонентных загрязнений воздуха при смоге с учетом класса опасности компонентов, но также органично вписать эти расчетные оценки в общую сумму нагрузок от погодных-климатических условий, в частности температуры воздуха и метеорологических явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

АП-170. Авиационные правила (2003). Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс / В сб.: Авиационные правила. Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс. Ч. 170. Т. 2. — М.: Изд.-во МАК, с. 113—124.

Видимость в аэропортах (2010). Сообщение. «Общество». Краткие новости. URL:<http://www.rb/new/society/2010/08/06/114532.htm> (дата обращения 25.06.2011).

ГОСТ 15150—69 (СТ СЭВ 991-78) (1991). Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. — М.: Изд.-во стандартов. 58 с.

Кожевников Б. Л. (2009). Оценка изменений климата энтропийным информационно-статистическим методом // Метеорологический вестник. Т. 2, № 2(3). С. 140—148. URL:<http://elibrary.ru/download/50487038.pdf> (дата обращения 22.12.2009).

Кожевников Б. Л. (2010а). Методика расчета комплексных оценок агрессивности погодно-климатических условий для технических целей / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Специальность 25.00.30 — метеорология, климатология, агрометеорология. — СПб, ГГО. 34 с.

Кожевников Б. Л. (2010б). О расчете комплексных оценок агрессивности погодно-климатических условий для техники // Общество. Среда. Развитие. № 3. С. 234—238.

Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух (2010). — СПб, НИИ «Атмосфера». 489 с.

Смог в Москве (2010). Википедия. URL:<http://yandex.ru/yandsearch?text> (дата обращения 25.06.2011).

УДК 551.510.42

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ОСНОВНЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА АРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ РОСГИДРОМЕТА

*А. И. Решетников, А. В. Зинченко, Н. Н. Парамонова,
В. И. Привалов, В. М. Ивахов, К. В. Казакова*

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

Поступила в редакцию 7.09.2011
Поступила после доработки 10.10.2011

Введение

За последние 150 лет произошло повышение глобальной среднегодовой температуры воздуха на 0,7 °С, что значительно превышает ее естественные колебания за последние десять тысяч лет (IPCC, 2007). Одной из основных причин подобного повышения температуры считается накопление в атмосфере парниковых газов (ПГ).

В России потепление происходит быстрее, чем в среднем по планете. Из последствий глобального потепления для России характерны: повышение температуры приземного слоя воздуха (особенно, в холодное время года); изменение количества осадков, влагосодержания почвы и речного стока; уменьшение площади морских льдов в Арктике; увеличение глубины протаивания в зоне вечной мерзлоты. При этом в ряде регионов РФ повышение среднегодовой температуры приземного слоя воздуха составило более 1 °С, а в арктических регионах — и 2 °С (Елдышев, 2008).

Следует отметить, что общее глобальное потепление не только не исключает экстремальных отрицательных температурных аномалий на региональном уровне, но может даже способствовать их усилению.

В настоящей работе проанализированы результаты измерений атмосферной концентрации основных парниковых газов (CO_2 и CH_4) на двух станциях Арктического региона, одну из которых (Териберка, Кольский полуостров, $69^\circ 10'$ с. ш., $33^\circ 08'$ в. д.) можно рассматривать в качестве фоновой, а другую (Новый Порт, полуостров Ямал, $67^\circ 41'$ с. ш., $72^\circ 52'$ в. д.) — в качестве станции, данные измерений на которой могут позволить контролировать техногенные выбросы ПГ на месторождениях природного газа и нефти в Западной Сибири. При анализе данных наблюдений на обеих станциях использованы данные эмпирической модели NOAA для глобальных фоновых концентраций CO_2 и CH_4 (GLOBALVIEW, 2009).

Цель настоящей работы — представить и проанализировать тенденции изменений концентраций парниковых газов в приземном слое атмосферы РФ (станция Териберка), произошедших в период после последней обобщающей результаты наблюдений публикации (Парамонова и др., 2001), а также продолжить исследования, начатые в работе Решетникова и др. (2009), по использованию данных мониторинга концентрации ПГ в воздухе для оценки влияния антропогенных источников на региональный фон ПГ. Актуальность работы обусловлена как проблемой регионального изменения климата на территории РФ, так и задачей контроля изменений относительного вклада антропогенных источников, связанных, например, с программами модернизации газовой отрасли и снижения уровня потерь природного газа.

Метод мониторинга парниковых газов

Мониторинг парниковых газов в РФ в настоящее время выполняется на сети, состоящей из трех станций Росгидромета: Териберка (Кольский полуостров), Новый Порт (полуостров Ямал) и Воейково (Ленинградская область). Станции выполняют отбор

проб воздуха в стандартные дневные сроки и предоставляют соответствующую метеорологическую информацию. Согласно Руководящему документу (1991), отбор проб воздуха на региональной станции ГСА Териберка выполнялся один раз в неделю последовательно в две идентичные фляги. На станции Новый Порт отбор проб выполняется в течение восьми дней после того, как ветер был направлен из сектора месторождений природного газа, в одну флягу ежедневно. Анализ проб воздуха выполняется в аналитической лаборатории Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. На станции Териберка наблюдения за концентрацией диоксида углерода были начаты в 1988 г., а за концентрацией метана — в 1996 г. Наблюдения на станции Новый Порт стали проводиться с 2003 г. за содержанием обоих указанных газов. Одновременно были начаты наблюдения за концентрацией метана и на станции Воейково.

Анализ проб воздуха на содержание CO_2 выполнялся на недисперсионном газоанализаторе URAS-2T (производство Германии), а анализ на содержание CH_4 — на отечественном газовом хроматографе ЦВЕТ 500М (Брунштейн и др., 1984; Сметанин и др., 2000). Для поддержания международной шкалы измерений концентраций каждого из газов использовались калибровочные газовые смеси, прошедшие аттестацию в соответствующих зарубежных лабораториях, ответственных за обеспечение качества стандартов на уровне требований Глобальной службы атмосферы (ГСА).

Основные результаты наблюдений на станциях Териберка и Новый Порт

Средние годовые концентрации CH_4 и CO_2 по данным наблюдений станции Териберка за период с 1998 по 2009 г., а также значения межгодового прироста концентрации этих газов ($\Delta C = C_i - C_{i-1}$) между настоящим (i) и предыдущим ($i-1$) годом представлены в табл. 1.

Таблица 1

Среднегодовые значения концентрации CH_4 и CO_2 и ежегодный прирост концентраций по данным наблюдений на ст. Териберка

Год	$[\text{CH}_4]$ млрд ⁻¹	$[\Delta\text{CH}_4]$ млрд ⁻¹	$[\text{CO}_2]$ млн ⁻¹	$[\Delta\text{CO}_2]$ млн ⁻¹
1998	1871,3	13,9	368,3	2,4
1999	1872,5	1,2	370,8	2,5
2000	1867,4	-5,1	371,5	0,7
2001	1865,0	-2,4	373,2	1,7
2002	1862,6	-2,4	375,5	2,4
2003	1879,2	16,7	377,6	2,1
2004	1871,7	-7,5	379,3	1,7
2005	1870,7	-1,0	381,4	2,0
2006	1871,3	0,5	384,4	3,0
2007	1877,3	6,0	384,6	0,2
2008	1894,9	17,6	387,5	2,9
2009	1905,0	10,1	389,4	1,9

Из табл. 1 следует, что за последние одиннадцать лет концентрация CO_2 увеличилась на 5,4 % (21,1 млн⁻¹), а прирост концентрации CH_4 за этот же период составил 1,8 % (33,7 млрд⁻¹). Межгодовой прирост концентрации CO_2 оставался положительным на протяжении всего рассматриваемого периода. Концентрация же CH_4 после 1999 г. вплоть до 2006 г. в основном уменьшалась. Резкое возрастание ее было отмечено только в 2003 г., после чего уменьшение концентрации возобновилось. Вновь концентрация CH_4 начала возрастать только в 2007 г., и эта тенденция сохраняется до настоящего времени.

Основные особенности межгодовой изменчивости, наблюдаемые на станции Териберка, отражают глобальные изменения поля концентрации рассматриваемых газов и согласуются с данными зарубежных станций фонового мониторинга для аналогичных широтных зон.

Станция Новый Порт расположена на побережье Обской губы на расстоянии 80—250 км от крупнейших в РФ Ямбургского, Уренгойского, Заполярного и ряда менее крупных месторождений природного газа, общий объем добычи газа на которых составляет более 500 млрд м³/год (более 80 % добываемого в стране природного газа). Сектору направлений ветра 50—90° соответствовали воздушные массы, пришедшие к станции Новый Порт из района Ямбургского (расположенного на расстоянии 70—140 км от станции) и Заполярного (расположенного на расстоянии 180—230 км от станции) месторождений природного газа. Сектору 90—150° соответствовали воздушные массы, пришедшие из района Уренгойского и Северо-Уренгойского месторождений (расположенных на расстояниях 150—250 км от станции), а также ряда менее крупных месторождений. В секторе 90—180° находится практически вся исходная часть системы транспортировки природного газа в направлении Южного Урала и центра европейской части России.

При направлении воздушных потоков из указанных секторов утечки природного газа при добыче и транспортировке, а также организованные технологические выбросы способствуют формированию повышенных концентраций CH₄ на станции Новый Порт. Южнее месторождений природного газа расположены основные месторождения нефти, сжигание больших объемов попутного (нефтяного) газа на которых приводит к выбросам значительного количества CO₂ в атмосферу.

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений концентрации CH₄ на станциях Новый Порт и Териберка, их сглаживающая аппроксимация и фоновые уровни. В качестве фона для сравнения использовались значения референтного уровня (MBL), рассчитываемого с использованием глобальных эмпирических моделей NOAA (GLOBALVIEW-CH4, 2009; GLOBALVIEW-CO2, 2009).

На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений концентрации CO₂ на станциях Новый Порт и Териберка, их сглаживающие аппроксимации и фоновые уровни.

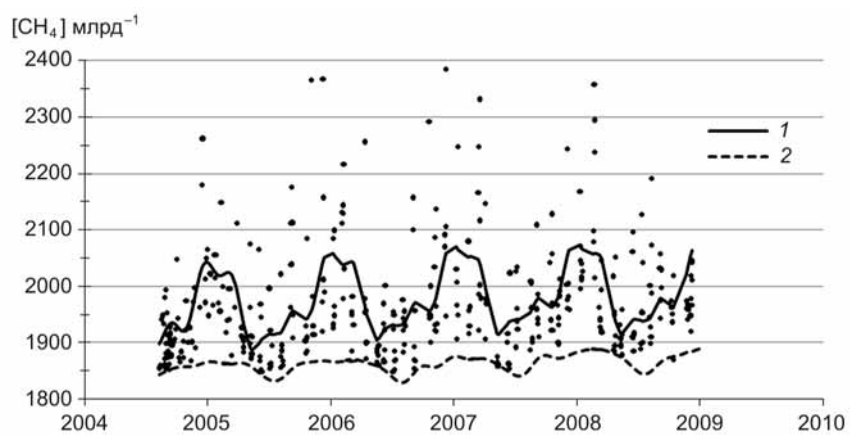


Рис. 1. Результаты измерений концентрации CH_4 на станции Новый Порт за 2004—2009 гг.

1 — сглаживающая аппроксимация, 2 — фоновая концентрация для широты станции Новый Порт.

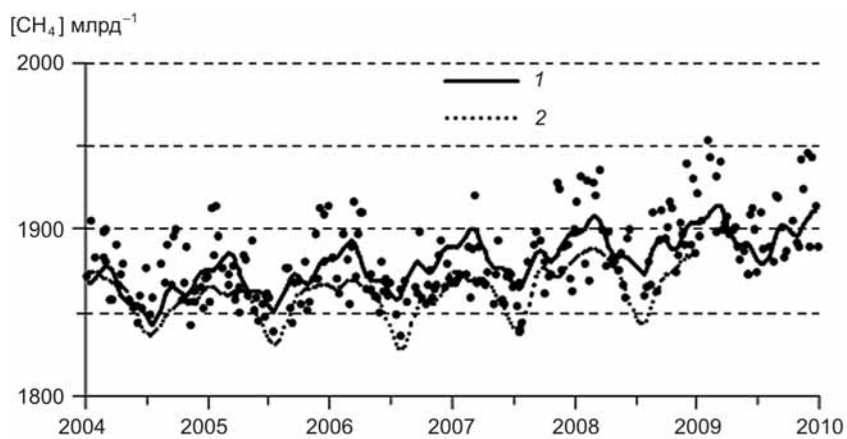


Рис. 2. Результаты измерений концентрации CH_4 на станции Териберка за 2004—2010 гг.

1 — сглаживающая аппроксимация, 2 — фоновая концентрация для широты станции Териберка.

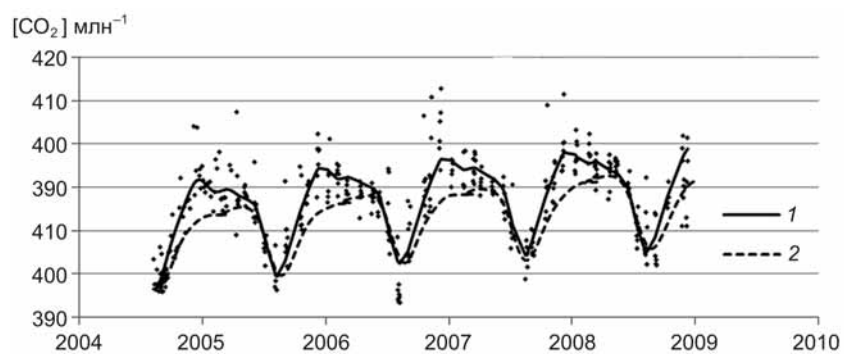


Рис. 3. Результаты измерений концентрации CO_2 на станции Новый Порт за 2004—2009 гг.

1 — сглаживающая аппроксимация, 2 — фоновая концентрация для широты станции Новый Порт.

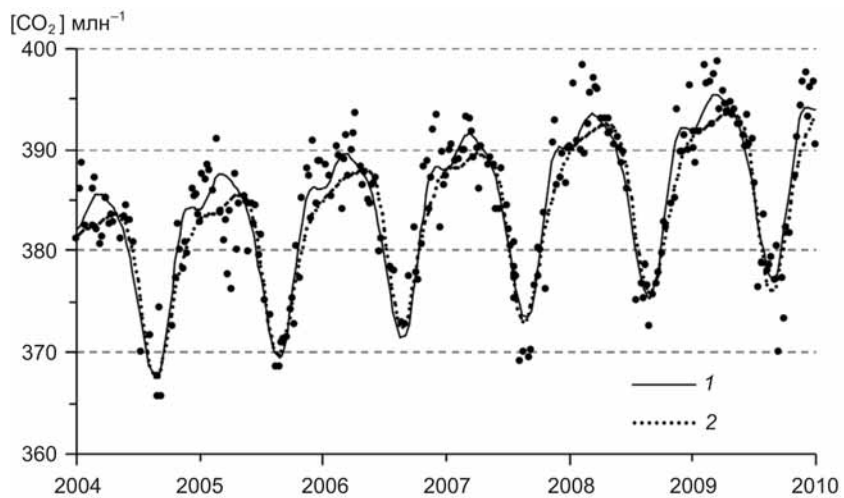


Рис. 4. Результаты измерений концентрации CO_2 на станции Териберка за 2004—2010 гг.

1 — сглаживающая аппроксимация, 2 — фоновая концентрация для широты станции Териберка.

Результаты сравнений среднегодовых данных измерений концентраций ПГ на станциях Новый Порт и Териберка приведены в табл. 2 (для CH_4) и табл. 3 (для CO_2).

Таблица 2

Среднегодовые концентрации CH_4 на станциях Новый Порт и Териберка, результаты их сравнения (разность $C_{\text{НП}} - C_{\text{Т}}$) и межгодовой прирост среднегодовой концентрации CH_4 на станции Новый Порт ($C_{\text{НП } i} - C_{\text{НП } i+1}$) за 2004—2009 гг.

Год	Среднегодовая концентрация CH_4 , млрд ⁻¹		$(C_{\text{НП}} - C_{\text{Т}})_j$, млрд ⁻¹	$(C_{\text{НП } i} - C_{\text{НП } i+1})$, млрд ⁻¹
	ст. Новый Порт	ст. Териберка		
2004	1961,7	1871,7	90	
2005	1957,6	1870,7	86,9	-4,1
2006	1976,3	1871,3	105,0	18,7
2007	1985,0	1877,3	107,7	8,7
2008	2006,4	1894,9	111,5	21,4
2009	2010,8	1905,0	105,8	4,4

Таблица 3

Среднегодовые концентрации CO_2 на станциях Новый Порт и Териберка, результаты их сравнения (разность $C_{\text{НП}} - C_{\text{Т}}$) и межгодовой прирост среднегодовой концентрации CO_2 на станции Новый Порт ($C_{\text{НП } i} - C_{\text{НП } i+1}$) за 2004—2009 гг.

Год	Среднегодовая концентрация CO_2 , млн ⁻¹		$(C_{\text{НП}} - C_{\text{Т}})_j$, млн ⁻¹	$(C_{\text{НП } i} - C_{\text{НП } i+1})$, млн ⁻¹
	ст. Новый Порт	ст. Териберка		
2004	385,6	379,3	6,3	-
2005	387,3	381,4	5,9	1,7
2006	389,3	384,4	4,9	2,0
2007	389,8	384,6	5,2	0,5
2008	393,1	387,5	5,6	3,3
2009	407,2	389,4	17,8	14,1

Обсуждение результатов

Из табл. 2 следует, что среднегодовой уровень фона CH_4 , наблюдавшийся на станции Териберка, превышен на станции Новый Порт в среднем на 101 млрд^{-1} (5,4 % фонового уровня). Фон концентрации метана на станции Териберка начиная с 2007 г. имел тенденцию к росту. На станции Новый Порт также наблюдался рост концентрации CH_4 с 2007 г., темпы которого в 2008 г. несколько замедлились, но снова возросли в 2009 г.

Из рис. 1 видно, что на станции Новый Порт сезонные вариации концентрации CH_4 в шесть-семь раз больше, чем на станции Териберка, и в случае модельного глобального фона (MBL). Разность максимального и минимального значений сглаженных концентраций составила в среднем $\sim 150 \text{ млрд}^{-1}$, а на станции Териберка 20—22 млрд^{-1} .

Одной из причин большой амплитуды сезонных колебаний могло быть влияние организованных и неорганизованных выбросов в атмосферу природного газа в районах его добычи. Однако, согласно статистическим данным (Динамика основных производственных показателей ТЭК, 2008), объем добычи за рассматриваемый период до 2008 г. изменялся незначительно. Существенный вклад в величину амплитуды сезонных вариаций концентрации метана мог внести сезонный ход толщины пограничного слоя атмосферы (ПСА). При разной толщине ПСА приращения концентраций ПГ над фоновым уровнем, обусловленные региональными источниками, распределяются по слою перемешивания разной толщины.

Для исключения влияния толщины ПСА на результат измерений концентрации CH_4 использовалась модель HYSPLIT (www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html), позволяющая рассчитать высоту пограничного слоя в районе расположения станции, что позволило скорректировать среднемесячные отклонения концентрации от фоновых значений. Это было сделано посредством введения поправок в величину разности между измеренной и

фоновой концентрациями ($\Delta C_i = C_{i \text{ изм}} - C_{i \text{ фон}}$), отражающей вклад естественных и антропогенных источников. Влияние толщины ПСА на величину концентрации CH_4 исключалось посредством умножения указанной разности на отношение рассчитанной по модели HYSPLIT высоты верхней границы ПСА к ее максимальному среднемесячному значению для конкретного года:

$$\Delta C_{i \text{ кор}} = \Delta C_i \frac{H_{\text{ПСА } i}}{H_{\text{ПСА } i \text{ max}}},$$

где $H_{\text{ПСА } i \text{ max}}$ — максимальное для конкретного года среднемесячное значение толщины ПСА, $H_{\text{ПСА } i}$ — средняя толщина ПСА для конкретного месяца года.

В результате проведения указанной корректировки удалось привести разность ΔC_i к единой толщине ПСА, что позволило получить не искаженные влиянием изменения толщины ПСА среднемесячные концентрации CH_4 .

На рис. 5 приведен сезонный ход отклонения среднемесячной концентрации CH_4 от фоновой концентрации (без коррекции на сезонный ход толщины ПСА). На рис. 6 представлен сезонный ход среднемесячной толщины ПСА на станции Новый Порт за 2007—2008 гг., а на рис. 7 — сезонный ход приведенного к единой толщине ПСА отклонения среднемесячной концентрации CH_4 от фоновой концентрации.

Метод определения верхней границы пограничного слоя основан на синоптической информации. Ограниченное число метеорологических станций в регионе, где расположена станция Новый Порт, отрицательно сказывалось на точности определения высоты пограничного слоя в районе станции.

В течение шести месяцев (с января по июнь) при температуре активного слоя почвы на глубине 10—20 см ниже 0 °С превышение концентрацией фоновому уровню обусловлено чисто антропо-

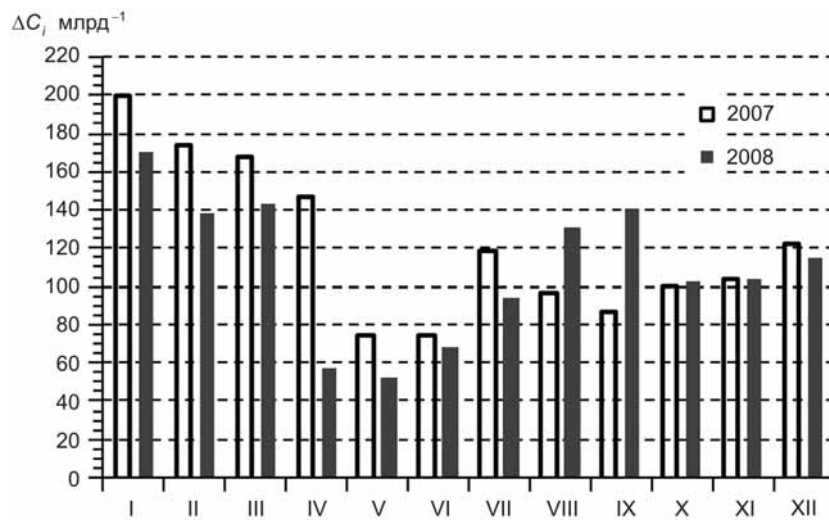


Рис. 5. Сезонный ход отклонений среднемесячных значений измеренных концентраций CH₄ от фоновых значений в 2007 и 2008 гг.

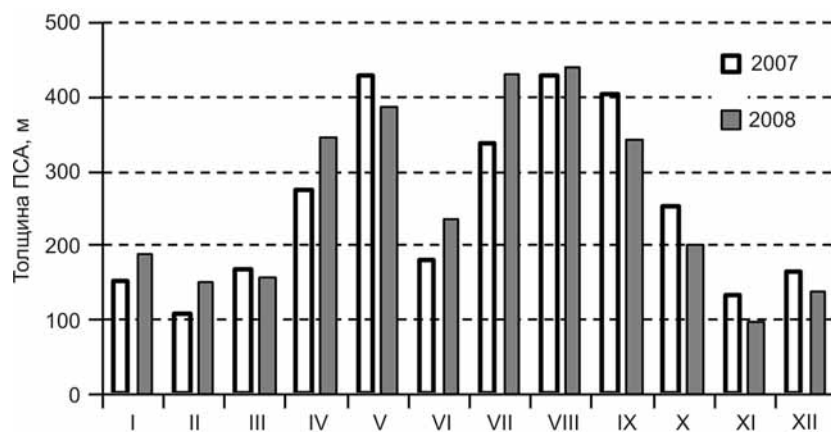


Рис. 6. Сезонный ход среднемесячных значений толщины ТОСА для станции Новый Порт за 2007 и 2008 гг.

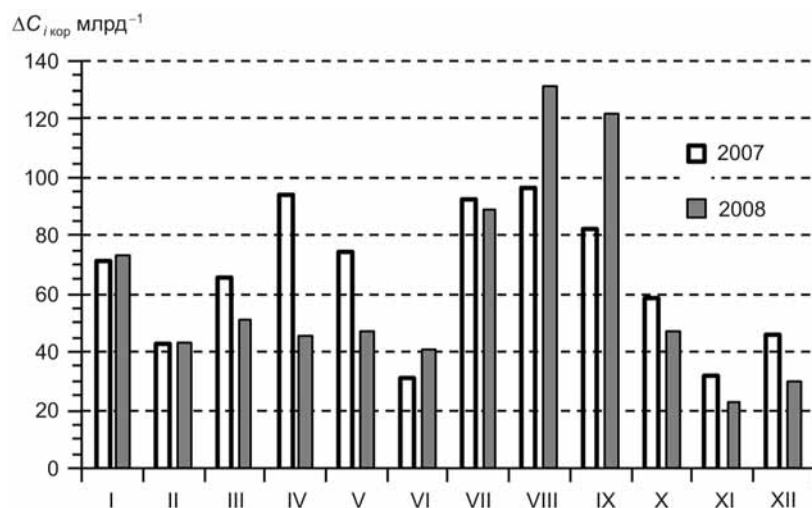


Рис. 7. Сезонный ход приведенного к единой толщине ПСА отклонения среднемесячных значений измеренных концентраций CH_4 от фоновых значений в 2007 и 2008 гг.

генным фактором, тогда как с июля по ноябрь — как антропогенными, так и природными источниками, которыми для рассматриваемого региона являются многочисленные болота, мелкие озера, а также заболоченные земли. Рядом авторов рассматривается и возможность дополнительной эмиссии метана за счет таяния вечной мерзлоты.

Из рис. 7 видно, что именно в месяцы, когда наблюдается наибольшая температура активного слоя почвы, а уровень болотных вод близок к поверхности, наблюдалось и максимальное превышение скорректированной на высоту ПСА концентрации CH_4 над его фоновым уровнем. Диапазон изменений концентрации CH_4 за счет антропогенной составляющей составлял от 30 до 90 млрд⁻¹ и более, в то время как в период активности метанпродуцирующих бактерий скорректированная концентрация CH_4 (обусловленная суммой обоих факторов) превышала 130 млрд⁻¹.

Очевидно, что в формирование anomalно высоких амплитуд сезонных вариаций CH_4 , помимо сезонного хода толщины ПСА, вносит вклад и роза ветров, характерная для этого района наблюдений. По данным метеорологической станции Новый Порт были рассчитаны характерные направления переноса воздушных масс для диапазона скоростей ветра, при которых отбирались пробы воздуха (3,0—11,0 м/с). При переносе воздушных масс из сектора 50—150° (рис. 8) наблюдалось обогащение приходящего к станции воздуха метаном, обусловленное технологическими потерями и неорганизованными утечками в процессе добычи и подготовке природного газа к транспортировке.

Скорость и направление ветра измерялись на площадке метеорологической станции Новый Порт. На рис. 9 приведены три градации скорости ветра: 3—5, 5—8 и 8—11 м/с. При более низких и более высоких скоростях ветра отборы проб воздуха не производились и данные наблюдений в построении розы ветров не использовались. Из рис. 9 видно, что в большинстве случаев

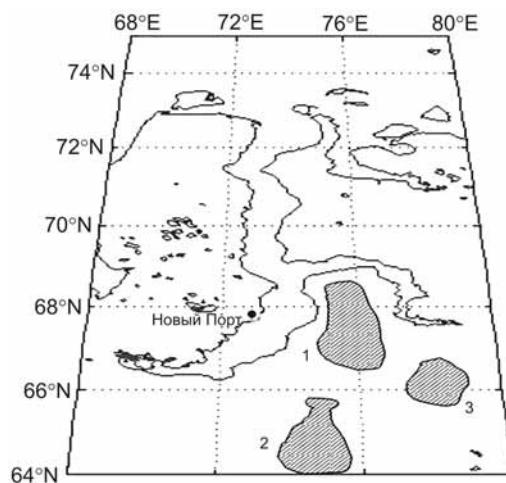


Рис. 8. Схема расположения основных газовых месторождений и станции Новый Порт.

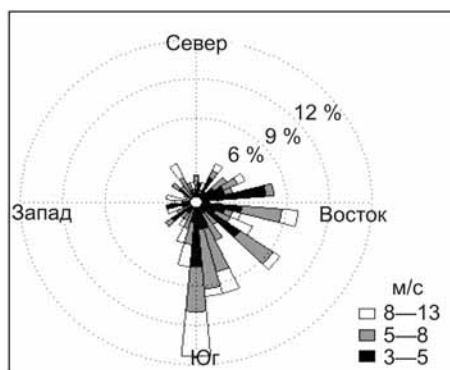


Рис. 9. Роза ветров для станции Новый Порт за период 2004—2009 гг., соответствующая времени отбора проб воздуха, концентрации CH_4 в которых характеризовались положительным отклонением от сглаженной кривой ее сезонного хода.

направления ветра в диапазоне указанных скоростей приходилось на сектор $50\text{—}185^\circ$ (более 60 % случаев наблюдений и не менее 20 % направлений ветра приходилось на сектор $50\text{—}90^\circ$). На сектор $185\text{—}0\text{—}50^\circ$ приходилось не более 20 % направлений ветра.

Из рис. 8 и 9 видно, что повышенные значения концентрации CH_4 на станции Новый Порт связаны в основном с поступлением воздушных масс из сектора газовых месторождений.

Как следует из статистических данных об объемах добычи природного газа в регионе за рассматриваемый период, он колебался от года к году не более чем на $\pm(1\text{—}1,5)\%$ (Потенциал российского газа, 2008). Максимальный прирост объемов добычи был отмечен в 2006 г., когда он возрос на 2,4 % по сравнению с 2005 г., в то время как среднегодовая концентрация CH_4 , наблюдаемая на станции Новый Порт, практически не изменилась.

В 2007 г. на станции Новый Порт был отмечен существенный прирост наблюдаемой концентрации CH_4 . В то же время, согласно данным Госстата РФ, добыча газа в 2007 г. упала на 0,3 %.

В 2008 г. наблюдаемый прирост был обусловлен глобальным ростом концентрации метана, что следует из данных изменений среднегодовой концентрации CH_4 на станции Териберка, на которой концентрация CH_4 оставалась практически неизменной в период 2005—2007 гг. и возросла сразу на 23,6 млрд⁻¹ в 2009 г. по сравнению с 2008 г.

По-видимому, наблюдаемые вариации концентрации в указанных пределах связаны не с изменениями объемов добычи природного газа и пропорциональным ростом его потерь в атмосферу, а с изменениями метеорологических условий (в том числе высоты верхней границы ПСА), которые сказываются на естественных колебаниях концентрации метана.

Из табл. 3 следует, что среднегодовая концентрация CO_2 на станции Новый Порт больше, чем на станции Териберка, в среднем на 7,6 млн⁻¹ (1,9 % фонового уровня). Причиной этого превышения, по всей вероятности, является антропогенная эмиссия CO_2 — результат сжигания попутного (нефтяного) газа в факелах на нефтегазовых и нефтяных месторождениях Западной Сибири, расположенных в среднем течении реки Оби (район городов Сургута, Нефтеюганска, Нижневартовска), на расстоянии приблизительно 800—1000 км от станции Новый Порт. Объемы сжигаемого попутного газа, по разным оценкам, составляют от 15 до 50 млрд м³/год.

Таким образом, данные наблюдений показывают, что на севере Западной Сибири эмиссия метана с территории основных газовых месторождений приводит к тому, что его концентрация существенно превышает глобальный фоновый уровень. Некоторое снижение указанного превышения, наблюдаемое в весенне-летний

период, обусловлено изменением условий распространения примеси, а именно увеличением высоты слоя перемешивания.

Заключение

На основе результатов работы и анализа представленных материалов можно сделать следующие выводы.

- Основные особенности межгодовых изменений концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы, наблюдаемых на станции Териберка за исследуемый период, отражают происходящие в атмосфере глобальные изменения, связанные с увеличением антропогенной эмиссии этих газов.

- Значительное превышение концентрации метана над глобальным фоновым уровнем, наблюдаемое на станции Новый Порт, обусловлено как антропогенной эмиссией метана в атмосферу при добыче природного газа на месторождениях севера Западной Сибири, так и значительной интенсивностью природной эмиссии от подстилающей поверхности, характеризующейся обширными заболоченными территориями.

- Высокая амплитуда сезонных колебаний концентрации метана, помимо вклада антропогенных и природных источников, обусловлена и значительными вариациями высоты верхней границы пограничного слоя атмосферы. Учет влияния этих вариаций позволил выявить «чистый» вклад антропогенных источников эмиссии метана в значения наблюдаемых концентраций.

- Представленные в работе данные мониторинга CH_4 в период низкой активности (или ее отсутствия) торфяного слоя болот и заболоченных земель создают основу для контроля антропогенной эмиссии в регионе.

- Анализ данных наблюдений CO_2 на станции Новый Порт также показал принципиальную возможность контроля уровня его антропогенных выбросов при сжигании попутного (нефтяно-

го) газа на нефтяных месторождениях, расположенных достаточно далеко (800—1000 км) от станции, что должно обеспечить возможность верификации мер, принимаемых по снижению этих выбросов, путем утилизации этого газа (введения в строй заводов по его переработке).

• Метод отбора проб воздуха с последующим анализом концентрации в нем парниковых газов в лаборатории не обеспечивает оперативности получения информации, необходимой для принятия мер по ограничению выбросов в атмосферу парниковых газов как при обычном функционировании предприятий по добыче углеводородов, так и при авариях на трубопроводах, приводящих к большим выбросам в атмосферу. Необходимые качество и оперативность контроля могут быть обеспечены только при постановке непрерывных измерений концентраций CO_2 и CH_4 на станции, дополненных измерениями изотопов углерода, а также использованием численного моделирования для интерпретации данных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Броунштейн А. М., Фабер Е. В., Шашков А. А. (1984). Газоаналитическая установка для осуществления мониторинга CO_2 в атмосферном воздухе // Труды ГГО. Вып. 472. С. 6—11.

Динамика основных производственных показателей функционирования ТЭК России, 2000—2008 гг. — М., Росстат, ГП «ЦДУ ТЭК».

Елдышев Ю. Н. (2008). Изменения климата: факты и факторы // Экология и жизнь. № 3 (76). С. 44—52.

Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Решетников А. И. (2001). Мониторинг углекислого газа и метана в России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 37, № 1. С. 38—43.

Потенциал российского газа. Реформы и климат (2006). Международное энергетическое агентство, с. 11.

Решетников А. И., Зинченко А. В., Яговкина С. В., Кароль И. Л., Лагун В. Е., Парамонова Н. Н. (2009). Исследования эмиссии метана на севере Западной Сибири // Метеорология и гидрология. № 3. С. 52—64.

Руководящий документ. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. 1991. РД 52.04.186—89. С. 693. — М., Госкомгидромет и Министерство здравоохранения.

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

GLOBALVIEW (2009). www.esrl.noaa/gmd/globalview

IPCC, Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge University Press. 996 p.

www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html

УДК 551.509.314: (551.507:629.73)

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ
СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОТЫ
НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ЗАДАЧЕ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА
ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНОСТИ
ПРИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ
ВЗЛЕТА/ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

Р. А. Круглов, А. В. Дробинская

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

Поступила в редакцию 5.09.2011

Метеорологическое обеспечение взлета/посадки воздушных судов требует автоматизации наблюдений на аэродроме за облачностью, в частности за такими ее характеристиками, как высота нижней границы, наличие облачных слоев и их пространственная протяженность. Для гарантии безаварийной посадки необходимо также краткосрочный прогноз этих характеристик.

В практике метеообеспечения полетов прогноз количества и формы облаков дается, как правило, синоптическим методом (Богаткин, Еникеева, 1992). Для прогноза высоты нижней границы облаков (ВНГО) существуют многочисленные методы, основанные на использовании эмпирических зависимостей, таблиц и номограмм, что усложняет решение задачи автоматизации краткосрочного прогноза характеристик облачности.

В связи с этим большой практический интерес представляют исследования, направленные на решение задачи прогнозирования характеристик облачности путем статистической обработки

результатов текущих измерений на заданном интервале наблюдений. Результаты этих исследований опубликованы в работах Гусевой (1986), Антиповой и Мошникова (1986), Финогеева (1986), Персина и др. (1986), которые были представлены на Всесоюзной конференции по авиационной метеорологии.

В работе Гусевой (1986) обсуждается методика объективного прогноза низких облаков. Предлагается на основе ожидаемого распределения вероятностей с учетом заданной пороговой вероятности давать прогноз ВНГО в альтернативной форме (будет высота облаков в прогнозируемый период превышать установленный минимум или не будет) или указывать вероятную высоту нижней границы облаков. Отмечается, что предлагаемый метод прогноза ВНГО может быть полностью автоматизирован (как определение класса синоптического процесса, так и расчет распределения вероятностей непревышения фиксированных высот).

В работе Антиповой и Мошникова (1986) рассматривается возможность статистической оценки вероятности того, что ВНГО окажется меньше установленного минимума ко времени прибытия воздушного судна на аэродром посадки.

В работах Финогеева (1986), Персина и др. (1986) уделяется внимание сверхкраткосрочному прогнозу ВНГО на срок до 15 мин. В работе Финогеева (1986) рассматривается адаптивная модель сверхкраткосрочного прогноза ВНГО. Предлагается использовать метод экстраполяции с дисконтированием. Принцип адаптации реализуется путем определения оптимальных параметров прогностической модели на ретроспективном участке временного ряда и использования их для прогноза ВНГО.

В работе Персина и др. (1986) рассматривается задача сверхкраткосрочного прогноза на интервал от 1—2 до 10—30 мин по результатам текущих учащенных измерений ВНГО. Особенностью такого подхода являются подготовка и контроль исходных данных, используемых для прогнозирования. Контроль включает процедуры исключения выбросов, разделение облачных слоев, определение их пространственной протяженности.

Алгоритмы, содержащие процедуры выделения облачных слоев и оценку количества нижней облачности и общего количества облаков по коэффициенту сплоченности, рассмотрены в работах Круглова, Дробинской (2011), Персина (1987). Предложенные алгоритмы позволяют повысить достоверность результатов инструментальных наблюдений за облачностью и дать более детальные сведения о ее характеристиках для решения задачи их краткосрочного прогноза.

Практическое использование этих алгоритмов для метеорологического обеспечения взлета/посадки воздушных судов сдерживалось ограниченным диапазоном и неудовлетворительным качеством информации, получаемой с помощью светолокационных измерителей высоты облаков в условиях выпадения осадков, особенно в виде снега. С внедрением новых измерителей ВНГО отечественного и зарубежного производства, использующих лазерную технологию измерений и современные методы обработки измерительной информации, указанные недостатки были устранены (Круглов, Дробинская, 2011).

В настоящее время использование лазерных измерителей позволило накопить большой объем экспериментальных данных, который дает возможность оценить эффективность алгоритмов, предложенных в работах Персина (1987) и Круглова (2008).

На рис. 1 представлены результаты обработки по указанным алгоритмам данных, полученных с помощью лазерных измерителей высоты облаков типа СЛ-31 в аэропорту г. Красноярск. Интервал между измерениями составляет 10 мин, поэтому наблюдается большой разброс результатов измерений вследствие пространственно-временной изменчивости высоты облаков. После статистической обработки изменчивость выходных данных существенно снижается. При этом наблюдается систематическое завышение результатов обработки по алгоритму С. М. Персина по отношению к результатам обработки по алгоритму Р. А. Круглова. Это объясняется тем, что используются разные критерии обнаружения облачного слоя.

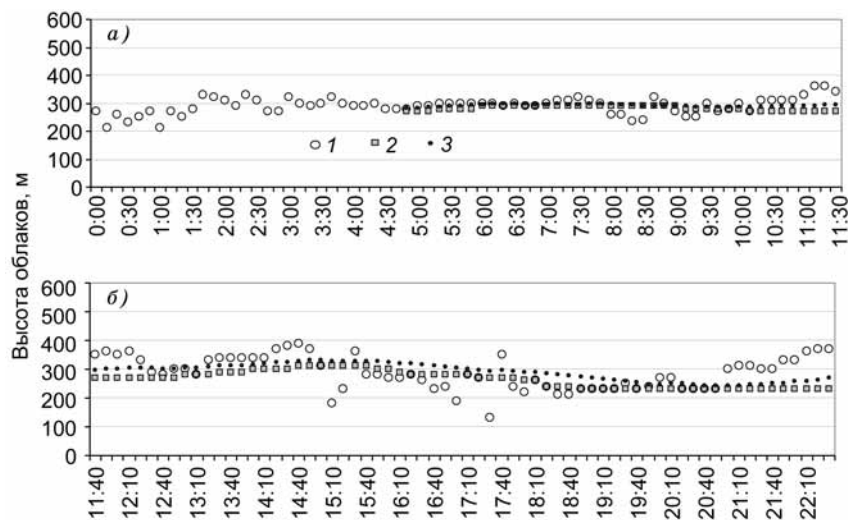


Рис. 1. Исходные данные о высоте облаков за каждые 10 мин (1) и результаты их обработки по алгоритмам Р. А. Круглова (2) и С. М. Персина (3).
Аэропорт г. Красноярска, 4 января 2011 г.
а) 00 ч 00 мин — 11 ч 30 мин, б) 11 ч 40 мин — 22 ч 30 мин.

В алгоритме Р. А. Круглова используется критерий порядковой статистики, который реализуется следующим образом. Результаты единичных измерений высоты облаков размещаются в ячейках цифровой памяти так, что порядковый номер ячейки определяет значение высоты, а код записи указывает число измерений, попавших в данную градацию за скользящий интервал наблюдения T .

Далее выполняют считывание записанных данных скользящим вдоль шкалы высот «окном» с охватом нескольких соседних ячеек памяти. Общее число ячеек памяти определяется приемлемой погрешностью дискретизации данных. Положение «окна» относительно шкалы высот, при котором число измерений $n(H)$, попавших в данную градацию за скользящий интервал наблюдений T , равно или превышает заданное пороговое значение $n_{\text{пор}}$,

определяет нижнюю границу облачного слоя. Оптимальная величина порога обнаружения при числе зондирований N за интервал наблюдений T составляет $n_{\text{пор}} = 0,3N$ (Круглов, 2008).

Согласно алгоритму С. М. Персина, облачный слой считается обнаруженным, если функция $n(H)$ имеет максимум, который совпадает со средним значением высоты облачного слоя. Расхождение между результатами статистической обработки увеличивается с увеличением разброса исходных данных (см. рис. 1 б). Когда разброс исходных данных уменьшается, результаты обработки практически совпадают (см. рис. 1 а). Следует отметить, что алгоритм Р. А. Круглова формирует выходные данные в виде ступенчатой кривой, так что в пределах отдельной ступени данные остаются неизменными, что характеризует большую устойчивость выходных данных.

На рис. 2 представлены результаты обработки данных, полученных с помощью лазерных измерителей высоты облаков в аэропорту г. Сургута. Исходные данные поступали с периодичностью 15 с, поэтому рассеяние результатов измерений значительно меньше, чем на рис. 1. Скользящий интервал наблюдения охватывает 13 отсчетов и составляет около 3 мин. Здесь также наблюдается систематическое завышение выходных данных после обработки по алгоритму С. М. Персина по отношению к данным, обработанным по алгоритму Р. А. Круглова. Завышение особенно велико для второго облачного слоя (см. рис. 2 б). Это объясняется тем, что исходный массив данных для второго слоя содержит информацию о наличии третьего слоя.

Алгоритм Р. А. Круглова позволяет получить достоверную информацию о высоте второго слоя при наличии третьего слоя без дополнительной обработки. Для отделения второго слоя от третьего по алгоритму С. М. Персина необходимо продолжить обработку исходных данных, отнесенных ко второму слою. В противном случае среднее значение ВНГО из массива данных, содержащих информацию о двух облачных слоях, будет представ-

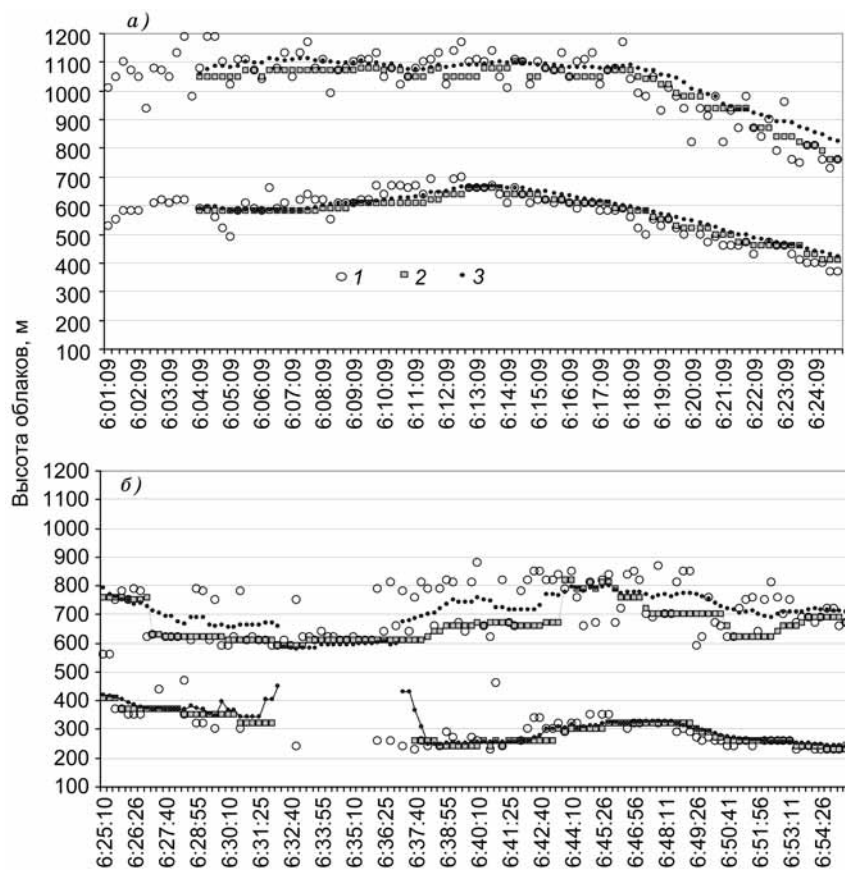


Рис. 2. Исходные данные о высоте облаков за каждые 15 с (1) и результаты их обработки по алгоритмам Р. А. Круглова (2) и С. М. Персина (3).
Аэропорт г. Сургута, 9 марта 2011 г.

а) 06 ч 01 мин 09 с — 06 ч 24 мин 56 с, б) 06 ч 25 мин 10 с — 6 ч 55 мин 26 с.

лять ложную информацию о наличии промежуточного слоя, как это показано на рис. 2 б).

Интерес представляет интервал времени, когда наблюдался разрыв в нижнем слое облачности (см. рис. 2 б). Видно, что на

краях разрыва результаты обработки по алгоритму С. М. Персина дают промежуточные значения ВНГО между облачными слоями, т.е. ложные данные, которые отсутствуют в результатах обработки по алгоритму Р. А. Круглова. Это объясняется тем, что второй алгоритм содержит процедуру, согласно которой исходные данные, выходящие за установленные пределы по критерию допускаемой погрешности измерений, отбраковываются, и в обработке участвует уменьшенный объем исходных данных.

Кроме того, алгоритм Р. А. Круглова содержит процедуру оценки количества облаков по критерию коэффициента сплоченности.

Коэффициент сплоченности отражает относительную пространственную протяженность облачного слоя и, согласно работам Персина (1987) и Круглова (2008), определяется как отношение числа измерений, значения которых не выходят за границы облачного слоя, к общему числу зондирований за интервал наблюдения. Если в облачном слое разрывы отсутствуют и разброс результатов измерений невелик, то коэффициент сплоченности равен единице.

Информация о коэффициенте сплоченности может быть использована для решения задачи автоматизации измерений количества облаков. Результаты расчета средней квадратической ошибки δ определения количества нижней облачности N по результатам m точечных измерений ВНГО, представленные в работе Боханова (1974), показали, что максимальное значение ошибки (δ_{\max}) составляет 0,15 и 0,11 соответственно при $m = 10$ и $m = 20$ при самом неблагоприятном значении $N = 0,5$. Ошибки за счет естественной изменчивости N существенно меньше δ и могут не учитываться.

В работе Боханова (1974) сделан вывод о том, что ошибка определения количества облаков по результатам инструментальных измерений высоты облаков не будет превышать ошибки визуальных оценок.

На рис. 3 результаты измерений ВНГО и их статистической обработки сопровождаются графиком изменения коэффициента

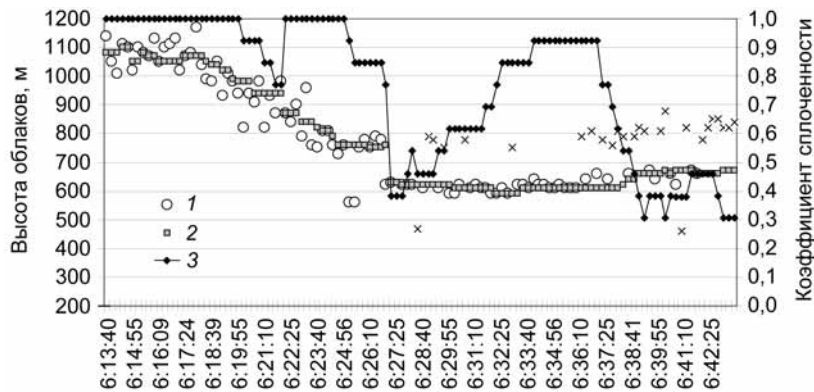


Рис. 3. Исходные данные о высоте облаков (1) за каждые 15 с и результаты их обработки по алгоритму Р. А. Круглова (2) с использованием коэффициента сплоченности (3). Аэропорт г. Сургута, 9 марта 2011 г., 06 ч 13 мин 40 с — 6 ч 43 мин 25 с.

сплоченности. Коэффициент сплоченности изменяется в широких пределах (от 0,3 до 1,0), что указывает на наличие разрывов в облачном слое. Несмотря на это, в выходных данных (после статистической обработки) пропуски отсутствуют. Кроме того, выходные данные носят более устойчивый характер, разброс данных по отношению к исходным существенно снижается.

При наличии тренда ВНГО (левая половина рисунка) причиной изменения коэффициента сплоченности является тот факт, что очередные результаты измерений выходят за установленные алгоритмом границы облачного слоя. При отсутствии тренда (правая половина рисунка) изменение коэффициента сплоченности связано с наличием разрывов в облачном слое. Кроме того, входные данные содержат информацию о наличии второго облачного слоя (на рисунке отмечены крестиками). И если бы алгоритм не содержал процедуру разделения облачных слоев, то обычно используемая процедура осреднения входных данных привела бы к ложной информации о наличии одного промежуточного облачного слоя, и результат прогноза оказался бы недостоверным.

Таким образом, рассмотренные алгоритмы Р. А. Круглова и С. М. Персина с выделением второго и третьего слоев целесообразно использовать для предварительной обработки исходных данных с целью повышения достоверности краткосрочного прогноза методами статистической обработки результатов текущих измерений. Эти алгоритмы также могут использоваться самостоятельно, если будут дополнены соответствующими процедурами для решения задачи краткосрочного прогноза. Например, если в алгоритме Р. А. Круглова рассчитывать коэффициент сплоченности не только для текущего положения облачного слоя, но и для прогнозируемого (как выше, так и ниже установленных алгоритмом границ), то можно определить направление тренда ВНГО и прогнозировать его с определенной вероятностью в соответствии с коэффициентом сплоченности. При этом интервал наблюдения (длительность скользящей выборки) следует увеличить до 10 мин и более.

Усовершенствование алгоритмов статистической обработки (Персин, 1987; Круглов, 2008) с целью их использования для краткосрочного прогноза станет предметом дальнейших исследований авторов настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антипова Л. П., Мошников А. Н. (1986). Оценка вероятности встречи воздушного судна с высотой нижней границы облаков ниже установленного минимума ко времени прибытия на аэродром посадки / Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по авиационной метеорологии. — М., с. 48.

Богаткин О. Г., Еникеева В. Д. (1992). Анализ и прогноз погоды для авиации. — СПб: Гидрометеиздат, с. 271.

Боханов В. Е. (1974). К вопросу автоматизации измерений количества облаков. // Труды ГГО. Вып. 342. С. 82—86.

Гусева Н. Н. (1986). Методика объективного прогноза низких облаков на основе объективного учета класса синоптического процесса / Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по авиационной метеорологии. — М., с. 50.

Персин С. М., Анискин Л. В., Боровиков А. А. (1986). Сверхкраткосрочный прогноз характеристик ВНГО / Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по авиационной метеорологии. — М., с. 47.

Круглов Р. А. (2008). Алгоритмы статистической обработки результатов измерений высоты облаков и результаты их практического использования для повышения достоверности и репрезентативности полученной информации о параметрах облачности на аэродроме / Сборник трудов конференции, 7—10 октября 2008. — СПб, РГГМУ, с. 148—150.

Круглов Р. А., Дробинская А. В. (2011). Анализ методических погрешностей и результаты сравнительных измерений высоты облаков на аэродроме с помощью светолокаторов и лазерных приборов // Труды ГГО. Вып. 563. С. 206—213.

Персин С. М. (1987). Измерение высоты нижней границы облаков и характеристик облачности как задача распознавания образов // Труды ГГО. Вып. 512. С. 79—91.

Финогеев Д. В. (1986). Адаптивная модель сверхкраткосрочного прогноза высоты нижней границы облаков / Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по авиационной метеорологии. — М., с. 49.

УДК 551.509.616

**СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ
С ЦЕЛЬЮ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР
(обзор)**

Г. И. Мазуров¹, В. Н. Козлов¹, В. И. Акселевич²

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: nanmaz@rambler.ru, vladimirn36@mail.ru

² Санкт-Петербургская академия управления и экономики
190103 Санкт-Петербург, Лермонтовский пр., 44
E-mail: vaksster@gmail.com

Поступила в редакцию 24.02.2011

После доработки 25.07.2011

Введение

Экстремальные температуры, отмечаемые в теплое и холодное полугодие, наблюдаются, как правило, при отсутствии облачности. Облачность является важным компонентом в формировании термического режима, определяющим фактором переноса излучения в атмосфере. Наличие облачности существенным образом сказывается на температуре подстилающей поверхности. Высокая приземная температура воздуха летом 2010 г. в средней полосе европейской части России, и особенно в Москве, при безоблачной антициклонической погоде способствовала развитию лесных и торфяных пожаров и оказала крайне отрицательное влияние на экологию природной среды, здоровье населения, а также привела к изменению траекторий движения циклонов. При действии крупных или многочисленных небольших пожаров в регионах сохранялись устойчивые области повышенного давления, которые циклоны обходили стороной, что способствовало

сохранению сухой и жаркой погоды, увеличению интенсивности пожаров (Заключение общественной комиссии, 2010).

В то же время, низкая температура в зимний период, и в 2011 г. в частности, приводит к резкому возрастанию коммунальных расходов, повышению затрат на отопление, нарушению работы наземного транспорта, увеличению заболеваемости населения. По оценке экономистов, понижение температуры зимой на 1 °С приводит к увеличению расхода газа на 1 % (Городецкий, 1979). В связи с этим перспектива изменения экстремальных температур для создания благоприятных, более комфортных условий является весьма актуальной.

Влияние облачности на температурный режим

Влияние на температурный режим нижней тропосферы могут оказывать естественная облачность, антропогенные облачные образования (АОО) и искусственно создаваемые облачные образования (ИОО).

Известно, что облачные образования создают парниковый эффект, приводят к существенной перестройке термобарического поля и к изменению траекторий движения барических образований (Панин, Никонова, 1981). В связи с этим целесообразно понижать температуру от экстремальных значений летом и повышать их зимой путем создания искусственных облачных образований. Краткий экскурс в историю активных воздействий показывает, что подобные попытки уже предпринимались (Борисенков, 1989; Будыко, 1980).

Облачный покров уменьшает приток коротковолновой радиации от Солнца и отток длинноволновой радиации от подстилающей поверхности в космическое пространство, способствуя созданию «парникового эффекта». Е. П. Борисенков (1986) показал, что создание искусственных облаков верхнего или среднего яруса приводит к изменению температуры приземного воздуха на 3—5 °С за сутки. Наличие десятибалльной облачности верхнего яру-

са может привести к понижению максимальной температуры в дневное время суток на 3—5 °С и повышению минимальной температуры в ночное время на 4—5 °С (Панин, Никонова, 1981). Суточная амплитуда температуры воздуха в ясную или малооблачную погоду в Санкт-Петербурге в июне в среднем составляет 14 °С, а при закрытом небе — 4,5 °С.

Для изменения температурных условий М. И. Будыко (1974) предложил засеивать нижнюю стратосферу сульфатным аэрозолем.

По данным Л. Т. Матвеева (1986), среднее количество облаков над планетой составляет 5—5,5 баллов. Исследования показывают, что за последнее десятилетие эта величина возросла примерно на 1 балл.

Согласно разработанному механизму влияния солнечной активности на облачность (Рубашов, 1967; Roberts, 1973), при вторжении потока заряженных частиц в атмосферу происходит ионизация нейтральных составляющих атмосферы, что приводит к концентрации водяного пара при относительной влажности менее 100 % и вследствие этого образованию облачности верхнего яруса. Это ведет к увеличению глобальной облачности от 1,8 до 3 баллов. Облачность отмечается на тех же высотах, где обычно наблюдается фронтальная перистая облачность, образующаяся естественным путем.

Антропогенные облачные образования

АОО возникают из-за непреднамеренного воздействия на атмосферные условия антропогенных факторов. АОО отличаются от естественной облачности тем, что в них может содержаться пыль, дымовые частицы и другие аэрозольные примеси (жидкие и твердые) в значительно большем количестве, чем в естественных облачных образованиях. Поэтому они имеют несколько другую радиолокационную отражаемость. Из них иногда могут выпадать осадки (Мазуров, 2009; Мазуров, Белогуб, 2009).

В настоящее время известно не менее шести разновидностей АОО (Мазуров, Белогуб, 2009):

1) облачные (конденсационные) следы, возникающие:

1.1) за самолетами (Качурин, 1990; Матвеев, 2000);

1.2) за вертолетами (Акселевич, 1984; Комаров и др., 1998; Нестерук, 1967);

1.3) за морскими судами (МС) (Мазуров и др., 1983; Мазуров, 1991, 2009; Руководство, 1982);

2) аэродромные (печные) туманы (Качурин, 1990; Матвеев, 2000);

3) смоги (фотохимические туманы) (Комаров и др., 1998; Матвеев, 2000);

4) облачные шлейфы от труб промышленных предприятий (Григорьев и др., 1978; Мазуров и др., 2003; Мазуров, 2009);

5) облачные шлейфы, связанные с крупными пожарами, особенно лесными (Григорьев и др., 1978);

6) облачные образования вблизи градирен ТЭЦ и АЭС (Мазуров, 2009).

Некоторые пространственно-временные характеристики антропогенных облаков и туманов приведены в работе Мазурова, Белогуба (2009). Кроме перечисленных разновидностей АОО, существуют и другие, например возникающие при запуске мощных ракет с корабля или с наземного автотранспорта над сушей (Мазуров, 2009), а также при запуске космических кораблей. Разновидности АОО 1.1 и 1.2 наблюдаются в средней и верхней тропосфере; облачные шлейфы от лесных пожаров распространяются в пределах континентов; разновидности АОО 1.3, 2—4 и 6 возникают преимущественно в пограничном слое атмосферы при устойчивой стратификации. Образование АОО в виде туманов, слоистых и слоисто-кучевых облаков в летний период происходит в теплых воздушных массах, в холодный период года — в сформировавшихся местных воздушных массах.

К таким устойчивым состояниям пограничного слоя атмосферы можно отнести следующие условия (Матвеев, 2000), наблюдаемые обычно в ночные часы:

наличие задерживающего слоя в виде инверсии температуры или изотермии;

понижение температуры воздуха со временем, кроме адвективного;

повышенная влажность воздуха, часто близкая к 100 %, в подынверсионном слое;

в основном небольшая скорость ветра, слабый турбулентный обмен;

наличие ядер конденсации — естественных или искусственных;

слабые вертикальные движения (не более 10 см/с), характерные для неконвективного облачного образования (Качурин, 1990; Матвеев, 2000).

Разновидности 4 и 6 АОО могут образоваться при возникновении локальных термиков, которые переходят в слоистообразные облака на уровне выравнивания их температуры с температурой окружающего воздуха под задерживающим инверсионным слоем, растягиваясь по горизонтали в зависимости от скорости ветра, турбулентности и влажности воздуха на десятки и сотни километров.

Это часто наблюдается в холодное полугодие, когда струя выбрасываемых из трубы промышленного предприятия газов поднимается на 20—30 м за счет перегрева при устойчивом состоянии атмосферы. На этой высоте температуры газов и окружающего воздуха выравниваются, и под температурной инверсией развивается облачный шлейф в виде разорванно-слоистого облака. Под влиянием ветра образовавшееся облако смещается по горизонтали и может сохраняться длительное время при влажности более 90 %.

Метеорологические условия при создании ИОО

Рассмотрим метеорологические условия возникновения и развития ИОО, которые, как правило, формируются целенаправленно по разработанному плану при помощи технических средств

активных воздействий, применяемых для создания ИОО в заданном районе.

Исследования по искусственным воздействиям на облака и туманы рассмотрены в ряде работ (Качурин, 1990; Серегин, 1981 и др.). Попытаемся рассмотреть эти вопросы применительно к искусственному созданию облачности. Для этого нам необходимо учитывать дисперсные системы (Морачевский, 1994), которые могут находиться в устойчивом или метастабильном (неустойчивом) состоянии (Качурин, 1990; Матвеев, 2000). Для создания ИОО слоистообразного типа необходимо рассматривать дисперсную систему в устойчивом состоянии. Наоборот, конвективные ИОО образуются при неустойчивых состояниях атмосферы, характеризующихся градиентом температуры, близким к сухоадиабатическому.

Повышение температуры воздуха на ограниченных территориях возможно и для рассеяния естественных образований как путем сжигания топлива (к примеру, это делается с использованием пропана в аэропорту Орли в Париже), так и с помощью метеоронов для разрушения задерживающих слоев и стимулирования конвекции.

Искусственное создание ИОО в средней тропосфере технически возможно с использованием водных аэрозолей, гигроскопических, льдообразующих и других реагентов при наличии соответствующих метеорологических условий (изотермии, инверсии и др.). Они определяются в результате самолетного зондирования атмосферы (Дубровина, 1982) или методом радиозондирования атмосферы (Осипова, 1971).

Таким образом, возможно создание искусственной облачности на ограниченном пространстве при влагосодержании в подынверсионном слое, близком к насыщению над водой, путем распыления экологически безопасных реагентов на соответствующей высоте. В действительности в естественных условиях не встречаются слои облачности при отсутствии задерживающего слоя.

Попытка оценить влияние ИОО (перистой облачности) на динамику барических образований с помощью прогностической мо-

дели по полным уравнениям в реальных метеорологических условиях была предпринята Б. Д. Паниным и Е. Т. Никоновой (Панин, Никонова, 1981). Цель эксперимента заключалась в оценке степени влияния перистой облачности на состояние атмосферы и синоптические процессы в целом. Сущность эксперимента состояла в моделировании перистой облачности (рис. 1, заштрихованная область) над реальным антициклонном в течение 24 ч.

Из приведенных в работе Панина, Никоновой (1981) расчетов следует, что наличие перистой облачности оказывает влияние не только на интенсивность барических образований, но и на изменение траекторий их движения. В период проведения эксперимента циклон на востоке исследуемого района (см. рис. 1) сместился примерно на 100 км южнее, а антициклон — севернее по отношению к реальным траекториям.

Изменение температуры за счет радиационных притоков тепла (δT_p), представленное на рис. 2, происходит через 11 ч после появления перистой облачности.

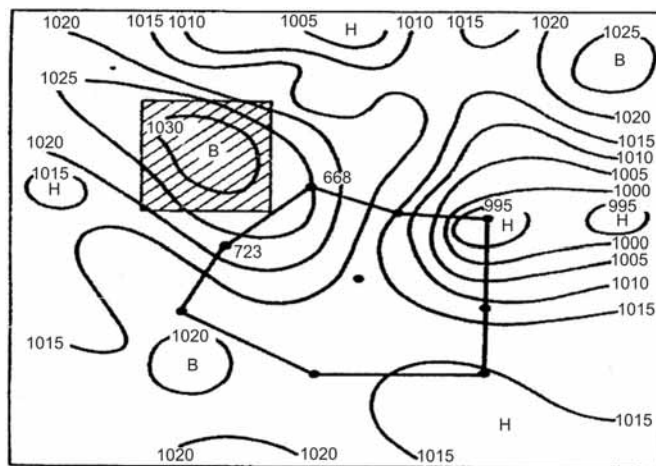


Рис. 1. Исходное поле приземного давления (гПа)
(Панин, Никонова, 1981).

668, 723 — номера узлов.

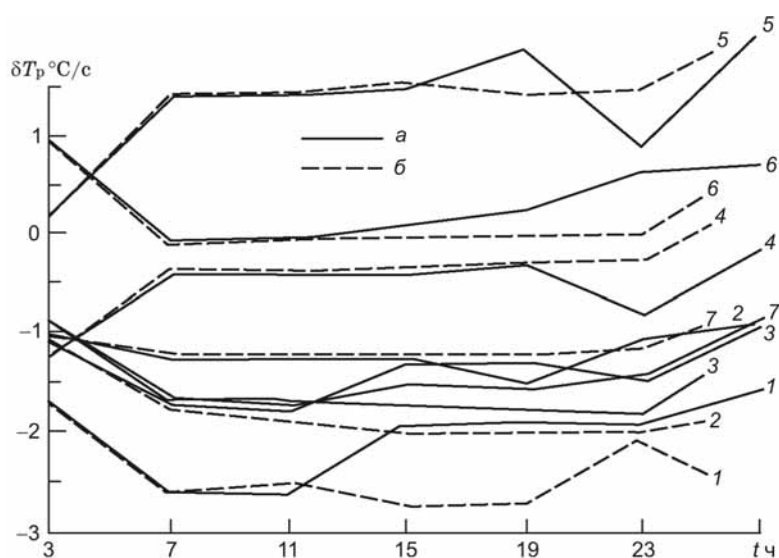


Рис. 2. Изменение температуры (δT_p) за счет радиационных притоков тепла при наличии перистой облачности (а) и для контрольного поля (б) на разных уровнях $\zeta = P/P_0$ (Панин, Никонова, 1981).

Кривая.....	1	2	3	4	5	6	7
ζ	1,0	0,85	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1

Искусственные облачные образования в пограничном слое атмосферы

Рассмотрим более подробно процесс образования ИОО в пограничном слое атмосферы. В нижних слоях атмосферы под задерживающими слоями скапливаются различные примеси, в том числе влага. При достижении относительной влажности 100 % на ядрах конденсации начинается образование водяных капель. Исследования показали, что искусственно внесенный под инверсионный слой водный аэрозоль, содержащий ядра конденсации, может стимулировать процесс возникновения ИОО.

Для создания облачных образований и увеличения времени их существования, как показали результаты исследований, в том числе результаты натуральных экспериментов, большое значение имеет аэродинамический спутный след, который возникает за движущимися транспортными средствами, а также в виде аэродинамической тени при обдуве воздушным потоком различных препятствий (Белоцерковский и др., 1983; Мазуров, Белогуб, 2009), в частности труб промышленных предприятий. В этих случаях создается циркуляция по замкнутому контуру, и попавшие в него примеси (внесенный реагент) удерживаются там, увеличивая время существования возникшего образования.

Наиболее ярко аэродинамический след прослеживается за такими летательными аппаратами, как самолет и вертолет. Аэродинамический след самолета хорошо изучен и используется для создания верхней и средней облачности (Зайцев и др., 1966). В случае вертолетов он также достаточно хорошо изучен путем теоретического моделирования (Белоцерковский и др., 1983) и лабораторных экспериментов при обдуве моделей в аэродинамической трубе ВВИА имени Н. Е. Жуковского. Нами было предложено использовать аэродинамический след, возникающий за вертолетом, для создания искусственной облачности, что было опробовано в натуральных экспериментах (Мазуров, 2009). Применение реагентов увеличивает время существования созданного ИОО. Интенсивность циркуляции в спутном следе тем больше, чем больше скорость движения аппарата-постановщика и чем больше его миделево сечение.

Фотоснимки фрагментов ИОО, образовавшихся в подынверсионных слоях пограничного слоя в спутном следе вертолета, приведены в работах Г. И. Мазурова (1991). Облако, искусственно созданное с использованием реагента, удерживается в спутном следе вертолета за счет создаваемой винтом вертолета циркуляции по замкнутому контуру. Этому же способствует смешение перегретых выбрасываемых газов и холодного окружающего воз-

духа, поскольку гигроскопические ядра конденсации и дополнительная влага вносятся выбрасываемыми газами (Комаров и др., 1999, 2000; Мазуров, Белогуб, 2009).

Некоторые результаты натуральных экспериментов по созданию ИОО с использованием вертолетов

Полевые эксперименты по созданию ИОО выполнялись над сушей с использованием вертолетов в 1977—1981 гг. Перед этими экспериментами и часто параллельно с ними проводились численные и лабораторные исследования для развития теоретической базы.

Как отмечает проф. Н. Е. Жуковский, возникновение мощного аэродинамического следа происходит за всеми летательными аппаратами (Белоцерковский и др., 1983). Также было установлено, что аэродинамический след возникает и за другими движущимися транспортными средствами, а также за неподвижными препятствиями при обтекании их воздушным потоком. Наблюдения показывают, что конденсационные облачные следы, образующиеся за самолетом, могут сохраняться длительное время. Это подтверждено в работах по теории развития конденсационных следов (Зайцев и др., 1966, 1977; Матвеев, 2000) и возникновения облачных следов за морскими судами (Руководство, 1982; Мазуров и др., 1983; Мазуров, Белогуб, 2009) и вертолетами (Нестерук, 1967; Акселевич, 1984).

Авторами было предложено для создания ИОО и увеличения времени их существования вводить реагент в аэродинамический спутный след, возникающий за движущимися транспортными средствами (Мазуров и др., 1988, 1990, 1992). Полевые эксперименты по созданию ИОО проводились в средней полосе европейской части России при высоких температурах (до 30 °С) летом и при низких температурах (до –30 °С) зимой в утренние, дневные и вечерние часы.

Анализ результатов полевых экспериментов по созданию ИОО с использованием вертолетов показывает, что существование таких образований значительно зависит от термической конвекции пограничного слоя воздуха, в котором работает вертолет, а также от скорости его полета. Это связано с тем, что циркуляция в аэродинамическом спутном следе вертолета становится более интенсивной с увеличением скорости полета.

Именно замкнутая циркуляция в спутном следе противостоит естественной атмосферной турбулентности и удерживает введенный в него реагент. Отмечались случаи, когда облачные образования сохранялись более 10 мин, попадая в слой инверсии температуры.

В июне в средней полосе России термическая конвекция имеет достаточно резко выраженный суточный ход, что потребовало привлечения данных радиозондирования атмосферы для оценки конвективной неустойчивости атмосферы путем сравнения реального вертикального градиента температуры (γ) с сухоадиабатическим градиентом ($\gamma_a = 1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$). Это позволило провести сравнение эффективности развития созданных ИОО при неустойчивой ($\gamma > \gamma_a$) и устойчивой ($\gamma < \gamma_a$) стратификации атмосферы.

Зависимости площади (S) и мощности (Δh) ИОО от градиента температуры (γ) показаны на рис. 3. Кривые на рисунке с точками показывают изменение вертикальной мощности ИОО, кривые с крестиками — изменение площади созданных образований в течение трех минут. Из рисунка видно, что при неустойчивой стратификации слоя воздуха циркуляция, возникшая в спутном следе вертолета, в среднем удерживает созданное образование как единое целое в течение двух минут. После этого площадь образования начинает уменьшаться за счет вертикальных потоков в слое с неустойчивой стратификацией.

В случае устойчивой стратификации мощность и площадь образования возрастают в течение трех минут, поскольку атмосферная турбулентность слабая.

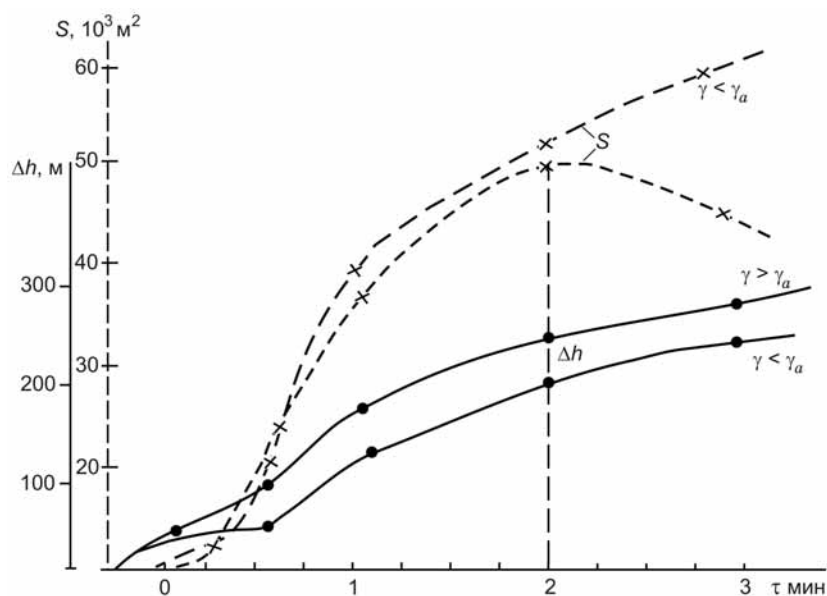


Рис. 3. Изменение площади (S) и мощности (Δh) ИОО, созданных с использованием вертолетов в натуральных экспериментах в июне 1980 г. при неустойчивом ($\gamma < \gamma_a$) и устойчивом ($\gamma > \gamma_a$) состоянии слоя воздуха, в котором создавалось ИОО.

Проведенные эксперименты (см., например, рис. 3) подтверждают вывод о том, что интенсивная циркуляция по замкнутому контуру в аэродинамическом спутном следе вертолета (летательного аппарата) противостоит естественной атмосферной турбулентности. Однако время существования ИОО в дневные часы в пограничном слое атмосферы не может быть существенным для изменения температурных условий.

Иная ситуация складывается в ночное время при условиях, когда ИОО могут существовать длительное время, оказывая влияние на температурный режим приземного слоя. Как следует из рис. 3, время создания таких ИОО составляет 2—3 мин.

Некоторые практические рекомендации по созданию ИОО

В 1966 г. В. А. Зайцев и А. А. Ледохович (Зайцев, Ледохович, 1966) впервые в метеорологической практике подали заявку на получение авторского свидетельства на способ создания искусственного слоя облаков в атмосфере. Они предложили вводить дополнительное количество воды в выхлопную струю турбореактивного самолета для достижения насыщения над водой в задерживающих слоях на высотах более 6000 м. Температура выхлопных газов составляет более 800 °С, и вода испаряется, дополняя водяной пар, образовавшийся в результате сгорания авиационного топлива.

При контакте с окружающим воздухом атмосферы происходит охлаждение выброшенного водяного пара и его конденсация с образованием водяных капель диаметром 2—8 мкм, которые в дальнейшем замерзают, превращаясь в ледяные частицы. Количество атмосферной влаги, кристаллизующейся на искусственных ледяных частицах в ИОО размером $100 \times 100 \times 0,3$ км, может составить ~80 тыс. т, что в 1600 раз больше количества влаги, вносимой в атмосферу самолетом. В итоге возникает облако, по своим термогигрометрическим характеристикам близкое к естественным облакам.

При проведении работ самолет-оператор совершает полеты галсами на расстояние до 100 км. Расстояние между галсами составляет около 5 км. За один полет самолет может создать облако размером не менее 100×100 км (Зайцев и др., 1977).

Описанные выше полевые эксперименты позволяют сформулировать некоторые практические рекомендации. Для уменьшения максимальных температур летом в целях борьбы с лесными пожарами и засушливыми условиями целесообразно использовать изобретение Зайцева—Ледоховича (Зайцев, Ледохович, 1966). Предложенный метод позволяет создавать облачность верхнего яруса в подынверсионных слоях на высоте 6—10 км, где парциальное давление водяного пара превышает его максималь-

ное парциальное давление над льдом и меньше его максимального парциального давления над водой.

Самолет Бе-200 может доставить в верхние слои атмосферы за один полет 8—12 т воды. Оснащение самолета современными форсунками позволяет из одного галлона (3785 л) жидкости диспергировать 50 триллионов капель размером около 5 мкм. Создание ИОО было реализовано в Африке с целью обеспечения комфортных температурных условий путем уменьшения максимальной температуры воздуха в приземном слое (Мазуров, 2009).

Изменение температурных условий в Санкт-Петербурге, площадь которого менее 30 × 40 км, может быть осуществлено при помощи одного самолета путем внесения водного аэрозоля в подынверсионный слой. В процессе работы создается облачный массив, способный накрыть город за один час. При скорости ведущего потока на высоте созданного искусственного облачного образования, равной 30 км/ч, город может быть защищен на протяжении нескольких часов в период экстремальных температур.

С целью повышения минимальных температур зимой целесообразно создавать облачность нижнего яруса в подынверсионных слоях. В этом случае, помимо самолетов, можно использовать и вертолеты. Так, вертолет Ми-26 может поднять до 50 т воды и диспергировать ее форсунками в подынверсионный слой. В теплый период года создание ИОО в дневные часы нецелесообразно, так как созданные облачные образования сохраняются в течение 10 мин, что не повлияет на температурные условия в приземном слое атмосферы.

Во всех случаях необходимо использовать данные радиозондирования и выбирать слои воздуха с минимальной скоростью ветра под слоями инверсии, близкими к состоянию насыщения водяным паром.

Для предотвращения нежелательного понижения температуры над локальными территориями в ночные часы целесообразно воспользоваться устройством, описанным в патенте РФ № 2060640 (Козлов и др., 1996).

Заключение

Проведенный в настоящей работе обзор показывает, что изменение экстремальных температурных условий происходит при наличии естественной облачности и антропогенных облачных образований, а также при создании искусственных облачных образований. Возможно использование различных способов создания ИОО (Зайцев и др., 1966, 1977; Мазуров и др., 1988, 1990, 1992; Мазуров, 2009).

Для снижения засухливости и пожароопасности в летний период целесообразно осуществлять создание ИОО в средней и верхней тропосфере с помощью современных самолетов-танкеров типа Бе-200, оснащенных устройствами для ввода в атмосферу водного аэрозоля. Для уменьшения влияния низких отрицательных температур в зимний период рациональнее создавать ИОО как в пограничном слое атмосферы, так и в подынверсионных слоях тропосферы.

Экономическая эффективность применения ИОО может в несколько раз превышать затраты на их создание, поэтому представляется целесообразным в дальнейшем провести более детальные исследования условий образования ИОО и времени их существования, разработать экономические оценки создания ИОО и их влияния на народное хозяйство путем изменения температурных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акселевич В. И. (1984). Об условиях образования облачных следов в нижнем слое атмосферы // Труды ЦВГМО. Вып. 20(1). С. 77—84.

Белоцерковский С. М., Васин В. А., Локтев Б. Е. (1983). К математическому нелинейному моделированию нестационарного обтекания несущего винта // ДАН СССР. Т. 240, № 6. С. 1320—1323.

Богаткин О. Г., Еникеева В. Д. (1985). Анализ и прогноз погоды для авиации. — Л.: Гидрометеиздат. 232 с.

Борисенков Е. П., Ефимова Л. К. (1986). Особенности влияния локализации перистой облачности на температуру и динамику атмосферы // Труды ГГО. Вып. 503. С. 76—81.

Борисенков Е. П., Базлова Т. А., Ефимова Л. К. (1989). Перистая облачность и ее влияние на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеиздат. 120 с.

Будыко М. И. (1974). Метод воздействия на климат // Метеорология и гидрология. № 2. С. 3—15.

Будыко М. И. (1980). Климат в прошлом и будущем. — Л.: Гидрометеиздат. 351 с.

Городецкий О. А., Сивопляс Г. Г. (1979). Организация, планирование гидрометеорологических работ и основы экономики. — Л.: Гидрометеиздат. 247 с.

Григорьев А. А., Липатов В. Б. (1978). Дымовые загрязнения атмосферы по наблюдениям из космоса. — Л.: Гидрометеиздат. 36 с.

Дубровина Л. С. (1982). Облака и осадки по данным самолетного зондирования. — Л.: Гидрометеиздат. 216 с.

Зайцев В. А., Кудрявцев Б. П., Ледохович А. А. (1977). Возможности и пути создания полей искусственных облаков // Метеорология и гидрология. № 7. С. 3—16.

Зайцев В. А., Ледохович А. А. (1966). Способ создания искусственного слоя облаков в атмосфере / А.с. СССР на изобретение № 219312 с приоритетом от 28.06.1966 г.

Заключение общественной комиссии по расследованию причин и последствий природных пожаров в России в 2010 г. / Электронный ресурс. URL: http://www.yabloko.ru/mneniya_i_publicatsii/2010/09/14 (дата обращения 11.12.2010).

Качурин Л. Г. (1990). Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеиздат. 464 с.

Козлов В. Н., Мазуров Г. И., Мазурова Н. Н. (1996). Устройство для повышения температуры и увлажнения воздуха / Патент РФ № 2060640. Заявка № 93-018803/15/018308 с приоритетом от 12.04.1993. 3 с.

Комаров В. С., Акселевич В. И., Заболотников Г. В. (1998). Некоторые особенности и природа влияния оптических характеристик атмосферы на использование авиации в северных районах Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т. 11, № 9. С. 944—948.

Комаров В. С., Мазуров Г. И., Акселевич В. И. (2000). Влияние аэрозолей на формирование антропогенных облачных образований / В сб.: Аэрозоли Сибири. Тезисы докл. VII Рабочей группы Российского аэрозольного общества. — Томск, с. 86.

Комаров В. С., Мазуров Г. И., Белогуб В. П. (1999). Сравнительный анализ условий развития антропогенных и искусственных облаков и туманов над морем // Оптика атмосферы и океана. Т. 12, № 1. С. 58—63.

Мазуров Г. И. (1991). Антропогенные облака / В сб.: Человек и стихия. — Л.: Гидрометеиздат, с. 15—17.

Мазуров Г. И. (2009). Основные результаты численных, лабораторных и натурных экспериментов по созданию искусственных облачных образований // *Метеоспектр*. № 4. С. 55—72.

Мазуров Г. И., Белогуб В. П. (2009). Антропогенные облачные образования: условия возникновения и возможности регулирования их развития // *Метеоспектр*. № 1. С. 81—90.

Мазуров Г. И., Кузнецов Ю. М., Белогуб В. П. (1983). Исследование структуры воздушных потоков над кораблем / Сб. статей ВНО училища. — Воронеж, с. 52—61.

Мазуров Г. И., Дубрович Н. А. (1988). Способ образования искусственного тумана / А.с. СССР № 161 4152. Приоритет от 25.04.1988. 3 с.

Мазуров Г. И., Зубков О. А., Акселевич В. И. (2003). Некоторые результаты натурных, численных и лабораторных экспериментов по визуализации аэродинамических струй в атмосфере / Тезисы докл. Международной конференции «Потоки и струи в жидкостях», 23—26 июня 2003 г. — СПб., РГМУ, с. 16.

Мазуров Г. И., Кузнецов Ю. М. (1990). Способ образования искусственного тумана над водной поверхностью / А.с. СССР № 1827751. Приоритет от 22.05.1990. 3 с.

Мазуров Г. И., Матвеев Л. Т. (1992). Способ образования искусственных облаков / А.с. СССР №1812652, приоритет от 10.10.92. 3 с.

Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л., Солдатенко А. С. (1986). Глобальное поле облачности / Под ред. Л. Т. Матвеева. — Л.: Гидрометеиздат. 279 с.

Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. (2000). — Л.: Гидрометеиздат. 778 с.

Морачевский В. Г. (ред.) (1994). Основы геоэкологии. — СПб.: Изд-во СПбГУ. 351 с.

Нестерук В. Н. (1967). Узоры на стекле // *Авиация и космонавтика*. № 12. С. 53—58.

Осипова Г. И. (1972). Развитие облачности в связи с характеристиками влажности атмосферы // *Труды ГГО*. Вып. 278. С. 121—132.

Панин Б. Д., Никонова Е. Т. (1981). Эксперимент по оценке влияния перистой облачности на динамику барических образований // *Труды ГГО*. Вып. 439. С. 117—122.

Рубашов Б. М. (1967). Проблемы солнечной активности. — М.: Наука. 362 с.

Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды (1982) / Под ред. И. П. Ветлова, Н. Ф. Вельтищева. — Л.: Гидрометеиздат. 300 с.

Серегин Ю. А. (1981). Исследования по искусственным воздействиям на облака и туманы // *Труды ЦАО*. Вып. 153. С. 30—45.

Roberts W. O. (1973). Relationships between solar activity and climate change / A symposium held at Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, Nov. 7—8, 1973. — NASA SP-366, p. 13—24.

УДК 550.385

**КОРРЕКЦИЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ,
ПОЛУЧЕННЫХ С БОРТА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА «ЭЛЕКТРО»**

А. А. Воронин

Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова
129128 Москва, ул. Ростокинская, 9
E-mail: main.voron@gmail.com

Поступила в редакцию 30.03.2011
Поступила после доработки 6.09.2011

Введение

Космический сегмент систем наблюдений и контроля гелио-геофизической обстановки включает постановку магнитных измерений на геостационарной орбите. Выведенный на геостационарную орбиту в плоскости экватора ИСЗ представляет собой платформу, на которой магнитовариационная станция выносится непосредственно в область действия внешних источников геомагнитного поля — электрических токов, протекающих в околоземном космическом пространстве.

Поскольку геостационарный ИСЗ вращается синхронно с Землей, показания установленной на нем магнитометрической аппаратуры зависят в основном от местного времени и геомагнитной активности. Это в какой-то мере снимает общую для космических исследований проблему разделения пространственных и временных вариаций параметров, измеряемых с борта ИСЗ, в том числе и магнитного поля. Орбита геостационарного ИСЗ при разном уровне геомагнитной активности может пересекать кромку плазменного слоя и плазмопаузы в ночном секторе, а в дневном секторе во время сильных магнитных бурь и магнитопаузу (Roederer et al., 1968; Skillman and Sugiura, 1971).

За рубежом геомагнитные измерения с борта геостационарных ИСЗ проводятся уже несколько десятилетий (McPherron et al., 1975). Первым отечественным геостационарным спутником, на котором проводились геомагнитные измерения, был «Электро», запущенный с космодрома Байконур ракетой-носителем «Протон» 31 октября 1994 г. Точка стояния спутника расположена на пересечении экватора с меридианом 76° в. д. (над Индийским океаном к югу от Индии). Магнитные измерения проводились с борта спутника с марта 1997 г. по август 1998 г. Предварительный просмотр данных показал, что соотношения между декартовыми компонентами вектора магнитного поля в точке стояния существенно отличаются от ожидаемых в соответствии с моделью геомагнитного поля (см. рис. 1).

В настоящей работе описывается процедура, позволяющая согласовать результаты измерений с борта ИСЗ «Электро» с модельными представлениями о поведении геомагнитного поля на геостационарной орбите. В отсутствие такой процедуры корректно проанализировать результаты наблюдений геомагнитного поля с борта ИСЗ «Электро» достаточно проблематично.

Процедура коррекции спутниковых магнитометрических данных

Для проведения магнитных измерений с борта ИСЗ «Электро» был выбран трехкомпонентный феррозондовый магнитометр СГ-76, изготовленный в НПО «Рудгеофизика». Датчики бортового магнитометра были установлены на специальной немагнитной штанге на расстоянии более 2 м от спутника.

Магнитометр СГ-76 преобразует напряженность магнитного поля в пределах ± 180 нТл по каждому из трех ортогональных компонентов в аналоговые напряжения от 0 до 6 В. Бортовая система телеметрии ИСЗ «Электро» принимала сигналы в форме частотной модуляции, поэтому магнитометр СГ-76 был дополнен блоком аналого-частотного преобразования, преобразующим аналого-

вые напряжения 0—6 В в частотно-модулированный сигнал 900—2700 Гц (Борец, Жузгов, Крутов, 1990). В процессе эксплуатации на спутниках типа «Прогноз» и станциях «Венера-9, -10» прибор показал высокую надежность и стабильность параметров.

Для анализа были использованы минутные данные о трех компонентах геомагнитного поля: X , Y , Z . Декартова система координат XYZ фиксирована относительно спутника и вращается вместе со спутником в экваториальной плоскости. Z -компонент ориентирован перпендикулярно плоскости географического экватора (параллельно вектору оси вращения Земли) с положительным направлением на север. X -компонент ориентирован в положительном направлении на восток. Y -компонент ориентирован в положительном направлении радиально от Земли (вдоль местной вертикали).

Исходные данные были представлены в виде текстовых файлов с привязкой по времени и содержали минутные значения трех компонентов геомагнитного поля (180 значений).

Эти файлы были сгруппированы в суточные директории по 24 часовых файла в каждой. На следующем уровне иерархии были созданы директории месячных данных, каждая из которых содержала суточные директории соответствующего месяца. Для упрощения доступа к данным вся исходная информация была объединена в единый файл, имеющий бинарный формат.

Представление данных наблюдений в графической форме (рис. 1) показывает, что в данных имеются разрывы. К разрывам относятся те участки данных, на которых магнитометр не работал. Помимо этого, в данных присутствовали так называемые зашкалы — участки данных, на которых значения геомагнитного поля выходили за пределы динамического диапазона (± 180 нТл). Эти участки данных были исключены из рассмотрения.

Кроме того, значения компонентов магнитного поля существенно отличаются от значений, ожидаемых в соответствии с моделью геомагнитного поля. На геоцентрическом расстоянии порядка 36 000 км (на геостационарной орбите) состояние геомаг-

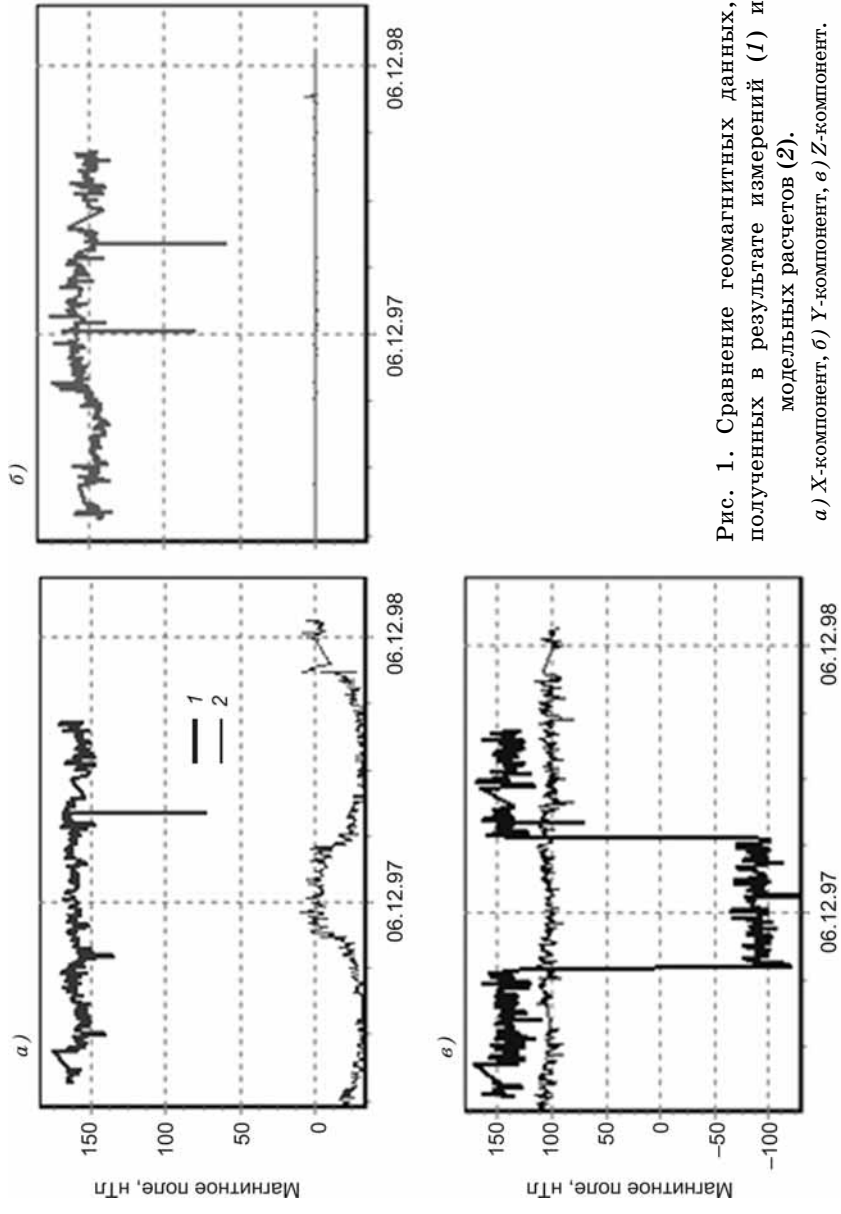


Рис. 1. Сравнение геомагнитных данных, полученных в результате измерений (1) и модельных расчетов (2).
 а) X-компонент, б) Y-компонент, в) Z-компонент.

нитного поля в значительной степени определяется внешними источниками поля — кольцевым током, токами на магнитопаузе и токами в хвосте магнитосферы. Одной из моделей, позволяющих учесть эти источники поля, является модель Алексева—Калегаева (Alexeev et al., 1996).

На рис. 1 для периода март 1997 г. — август 1998 г. представлены три компонента магнитного поля: измеренные значения (1) и расчетные значения (2), вычисленные при помощи модели Алексева—Калегаева по соответствующим геомагнитным индексам D_{st} , A_l и данным наблюдений за солнечным ветром.

Расхождение измеренных и модельных данных может быть следствием нештатной ориентации немагнитной штанги, на которой были установлены датчики магнитометра. В этом случае значения измеренных и модельных магнитных полей для каждого компонента могут не совпадать. Установить фактическую ориентацию немагнитной штанги можно, потребовав совпадения среднесуточных значений измеренных и модельных векторов магнитного поля на магнитоспокойных интервалах. Использование среднесуточных значений позволяет не учитывать при определении ориентации штанги суточный ход геомагнитного поля на геостационарной орбите. Как уже указывалось выше, использовалась модель Алексева—Калегаева (Alexeev et al., 1996), которая подходит для описания поведения магнитного поля в точке стояния спутника. В этой модели учитываются основные источники поля на больших геоцентрических расстояниях: кольцевой ток, токи на магнитопаузе, токи внутри Земли, токи в хвосте магнитосферы.

Для определения ориентации немагнитной штанги использовались углы Эйлера, которые описывают поворот абсолютного твердого тела в трехмерном евклидовом пространстве. Углы Эйлера определяют три поворота системы, которые позволяют привести любое положение системы к текущему.

Обозначим начальную систему координат (x, y, z) , конечную — (X, Y, Z) . Пересечение координатных плоскостей xy и XY называется *линией узлов* N .

Обозначим углы между осями и линией узлов следующим образом:

θ — угол между осью x и линией узлов,

β — угол между осями z и Z ,

φ — угол между осью X и линией узлов.

Повороты системы на эти углы называются прецессией, нутацией и поворотом на собственный угол соответственно.

По теореме Эйлера любую комбинацию поворотов тела в пространстве можно представить одним поворотом вокруг некоторой оси на некоторый угол, причем ось и угол являются единственными для данной комбинации поворотов. Способ определения углов показан на рис. 2.

Для совмещения векторов \mathbf{P} и \mathbf{B} (см. рис. 2) необходимо совместить ось X с вектором \mathbf{u} , проходящим через точку пересечения

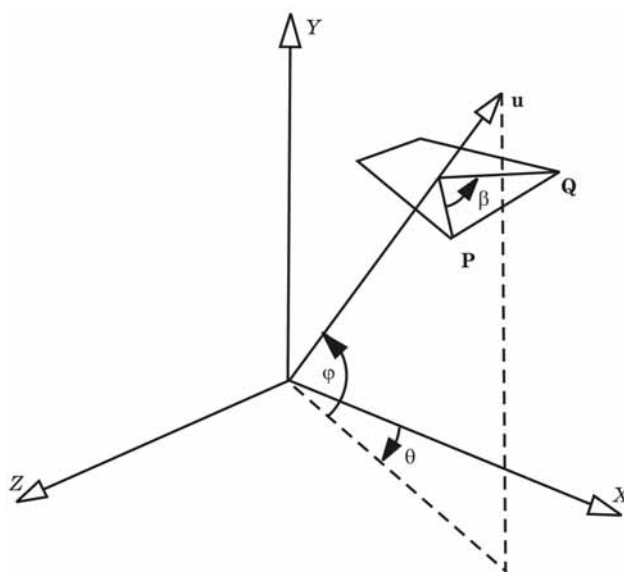


Рис. 2. Углы Эйлера.

векторов \mathbf{P} и \mathbf{B} , и выполнить поворот на угол β . Для совмещения векторов \mathbf{X} и \mathbf{u} выполняются два вспомогательных поворота:

поворот системы координат вокруг оси Y на угол θ , для совмещения оси X с проекцией вектора \mathbf{u} на плоскости XZ ,

поворот полученной системы координат вокруг оси Z на угол φ для совмещения оси X с вектором \mathbf{u} .

После совмещения векторов \mathbf{P} и \mathbf{B} нужно отменить вспомогательные повороты. Таким образом, для поворота тела необходимо умножить исходный вектор на произведение пяти матриц поворота:

$$A = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(-\beta) & 0 & \sin(-\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\beta) & 0 & \cos(-\beta) \end{bmatrix}}_{\text{I}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\alpha) & -\sin(-\alpha) \\ 0 & \sin(-\alpha) & \cos(-\alpha) \end{bmatrix}}_{\text{II}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{III}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}}_{\text{IV}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}}_{\text{V}}, \quad (1)$$

где I — компенсирующие повороты, II — поворот вокруг оси, III — вспомогательные повороты.

Для того чтобы исключить влияние геомагнитных возмущений на результат для вычисления углов Эйлера были использованы магнитоспокойные периоды (временные интервалы), в которые значения индекса геомагнитной активности A_p (т. е. суточные значения трехчасового индекса геомагнитной активности a_p) не превышали 7 (рис. 3).

Результат вычисления углов на одном из магнитоспокойных участков показан на рис. 4.

Углы Эйлера вычислялись на всех магнитоспокойных участках, которые удалось идентифицировать в имеющемся наборе данных.

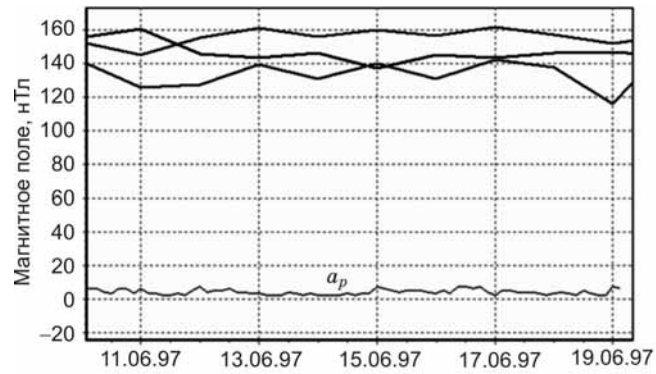


Рис. 3. Магнитоспокойный участок данных (значения индекса a_p показаны тонкой линией).

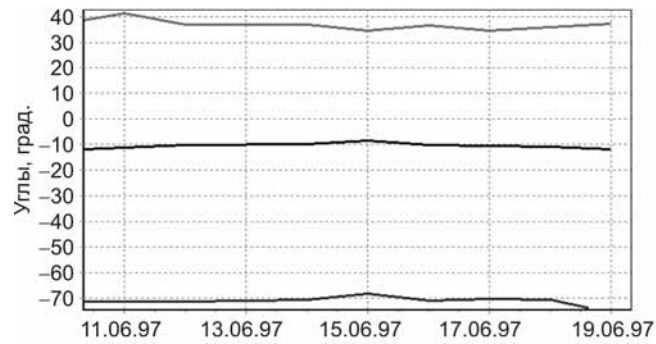


Рис. 4. Углы Эйлера, определенные на одном из магнитоспокойных участков.

За время нахождения спутника на орбите его два раза переворачивали. На рис. 5 выделены три периода, разделенных моментами переворота.

Вычисленные по магнитоспокойным участкам значения углов Эйлера мало отличались друг от друга в каждом временном интервале и были поэтому усреднены в каждом из них.

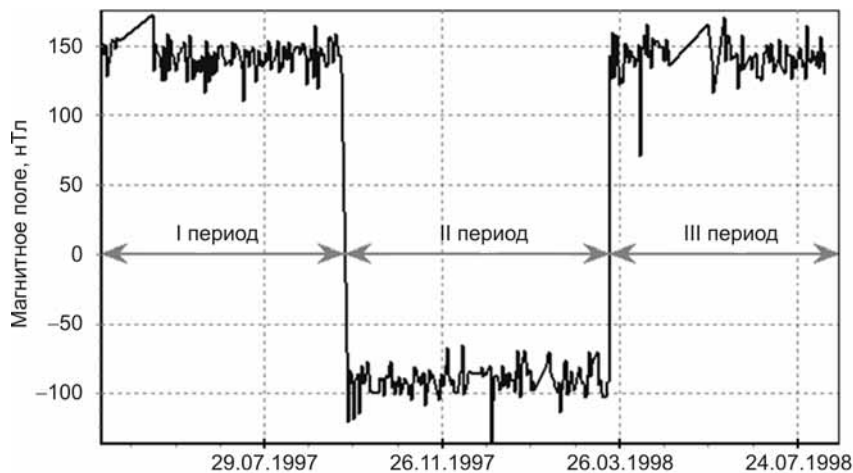


Рис. 5. Три периода (I—III), разделенные моментами переворота спутника.

I период: 1 апреля — 21 сентября 1997 г.;
 II период: 21 сентября 1997 г. — 19 марта 1998 г.;
 III период: 19 марта 1998 г. — 2 августа 1998 г.

Из табл. 1 видно, что на каждом из трех временных интервалов ориентация немагнитной штанги хотя и не была точной, но оставалась постоянной. Поэтому можно произвести коррекцию магнитометрических данных с помощью поворота системы координат.

Результат коррекции представлен на рис. 6. Как видно из рисунка, магнитометрические измерения в целом повторяют значения модельного поля, что свидетельствует о корректности использованного подхода.

Таблица 1

Вычисленные углы Эйлера

Угол	I период (1.04.97—21.09.97)	II период (21.09.97—19.03.98)	III период (19.03.98—2.08.98)
θ	-67,45	-111,19	-67,18
β	35,8	44,99	36,12
φ	8,15	-0,41	7,85

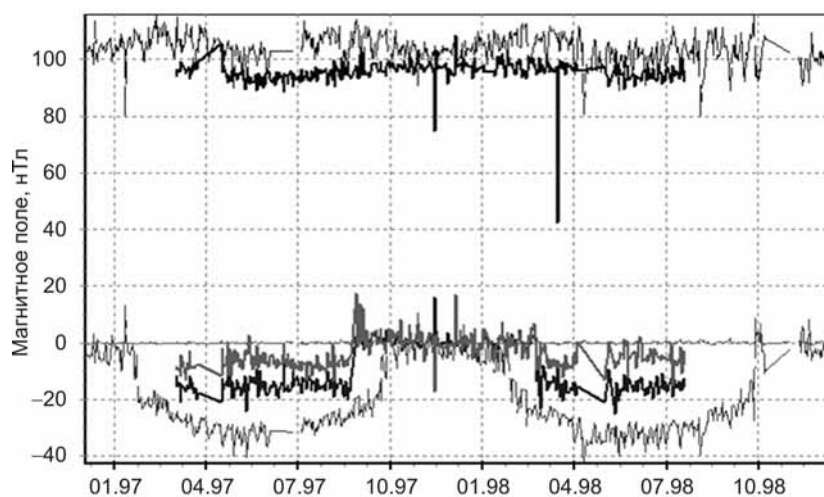


Рис. 6. Сравнение измеренного и модельного магнитных полей.

Заключение

Предложена процедура коррекции данных измерений геомагнитного поля, основанная на требовании совпадения трех компонентов измеренного поля с соответствующими компонентами поля, вычисленными с помощью модели Алексева—Калегаева на магнитоспокойных участках для конкретных условий, наблюдавшихся в это время в солнечном ветре, и соответствующих индексов геомагнитной активности.

Предположение о том, что ориентация немагнитной штанги была неточной, но оставалась постоянной, подтвердилось, что и позволило провести корректировку набора данных геомагнитных наблюдений на геостационарной орбите с борта ИСЗ «Электро». Некоторые результаты первых отечественных наблюдений за геомагнитным полем на геостационарной орбите станут предметом следующей работы.

Автор благодарен канд. физ.-мат. наук А. В. Цветкову за внимательное рецензирование статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борец В. В., Жузгов Л. Н., Крутов В. А. (1990). Средства и методы магнитных измерений на орбите геостационарного ИСЗ. — М., препринт ИЗМИРАН. № 7(892).

Roederer J. R. et al. (1968). Determination of magnetospheric parameters from magnetic field measurements at synchronous altitudes // *Trans. AGU*, 49. P. 227.

Skillman H. T., Sugiura M. (1971). Magnetopause crossing of the geostationary satellite ATS5 at 6,6 Re. // *J. Geophys. Res.* V. 76, № 1. P. 44.

McPherron R. L., Coleman P. J., Share R. C. (1975). ATS-6 UCLA fluxgate magnetometer IEEE // *Trans. on Aerospace and Electron. Syst.* V. AES-11, № 6. P. 110.

Плазменная гелиогеофизика (2008) / Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. — М.: Физматлит.

Alexeev I. I., Belenkaya E. S., Kalegaev V. V., Feldstein Ya. I. (1996). Grafe. Magnetic storms and magnetotail currents // *J. Geophys. Res.* V. 101. P. 7737.

**Оперативно-производственное совещание
«Модернизация метеорологической сети, результаты,
проблемы, пути решения»
(результаты реализации Проекта «Модернизация
и техническое перевооружение организаций
и учреждений Росгидромета»)**

В период с 11 по 13 октября 2011 г. в Санкт-Петербурге было проведено оперативно-производственное совещание «Модернизация метеорологической сети, результаты, проблемы, пути решения (результаты реализации Проекта «Модернизация и техническое перевооружение организаций и учреждений Росгидромета»).

В работе совещания приняли участие начальник УГТР Росгидромета В. М. Трухин, зам. начальника УГТР, технический координатор Проекта «Модернизация и техническое перевооружение организаций и учреждений Росгидромета» по наземной метеорологической сети Г. М. Баева, директор ГГО В. М. Катцов, руководители и специалисты большинства УГМС, специалисты НИУ Росгидромета, а также представители Фонда «Бюро экономического анализа» и организации-поставщика нового метеорологического оборудования ЗАО «ЛАНИТ».

С докладами о результатах модернизации метеорологической сети на совещании выступили директор ГГО В. М. Катцов и технический координатор Проекта Г. М. Баева.

На совещании были заслушаны доклады руководителей Верхне-Волжского, Среднесибирского, Обь-Иртышского УГМС, начальников Новосибирского ЦГМС—РСМЦ и Санкт-Петербургского ЦГМС-Р, в которых достаточно полно отражены результаты модернизации метеорологической сети в перечисленных УГМС, ЦГМС-Р, озвучены недостатки и упущения, проявившиеся в процессе модернизации сети проблемы и высказаны предложения по их устранению.

Большой интерес участников совещания вызвали сообщения специалистов Северо-Кавказского, Северного, Забайкальского,

Северо-Западного, Приморского и Якутского УГМС об опыте обеспечения работоспособности установленных автоматизированных метеорологических комплексов (АМК) и автоматических метеорологических станций (АМС).

Перед участниками совещания выступили сотрудники ГГО, ВНИИСХМ, ВНИИГМИ—МЦД, ААНИИ, Гидрометцентра России с докладами, вызвавшими неподдельный живой интерес слушателей. Кроме того, с сообщениями выступили представители БЭА и ЗАО «ЛАНИТ». Состоялась дискуссия по итогам заслушанных докладов и сообщений.

Совещание подвело итоги выполнения первого этапа модернизации метеорологической сети. Отмечено, что поставщиком (ЗАО «ЛАНИТ») к октябрю 2011 г. завершена поставка в УГМС, ЦГМС предусмотренных Проектом модернизации АМК, АМС и ААК (автоматизированных актинометрических комплексов), а также стационарных (СПЛ) и мобильных автоматизированных (МАПЛ) поверочных лабораторий.

К началу октября 2011 г. установлены около 80 % поставленных АМК, почти 30 % поставленных АМС и около 70 % поставленных ААК. Доля введенных в действие АМК, от которых регулярно (без пропусков) поступают в Центр сбора данных полные (с вводом визуально наблюдаемых характеристик) сообщения SYNOP, составляет около 60 %.

ЗАО «ЛАНИТ» совместно с организациями Росгидромета в сложных климатических условиях России выполнена беспрецедентная по масштабам и сложности работа по обеспечению наземной метеорологической сети современными техническими средствами автоматизированного получения, сбора и передачи информации.

В выступлениях участников совещания в ходе состоявшейся дискуссии неоднократно подчеркивалось, что большая часть (85 %) АМК, АМС, ААК установлена и введена в действие силами специалистов УГМС, ЦГМС и их наблюдательных подразделений (НП) за счет собственных ресурсов без выделения Росгидрометом дополнительного бюджетного финансирования.

Вследствие дефицита средств, неотработанного программного обеспечения АМК, АМС, ААК, слабо развитой инфраструктуры многих регионов России и как следствие редких выездов специалистов УГМС на сеть, значительное число введенных в эксплуатацию АМК, АМС, ААК в настоящее время работают неустойчиво, с большими перебоями.

Участники совещания отметили большую работу специалистов ЦА Росгидромета, УГМС, ЦГМС, наблюдательных подразделений, ГГО — головного НИУ в области метеорологических и актинометрических наблюдений по реализации Проекта, значительная часть которой выполнялась сверх и вне плановых заданий Росгидромета.

По итогам достаточно острой и заинтересованной дискуссии участники совещания пришли к единому мнению о том, что с целью обеспечения бесперебойного функционирования автоматизированной сети целесообразно создать в УГМС и крупных ЦГМС «группы мониторинга и оперативного технического обслуживания и ремонта оборудования автоматизированной сети» (ГМОТО) с соответствующим бюджетным финансированием.

Для координации деятельности, практической помощи ГМОТО и осуществления мониторинга функционирования всей автоматизированной сети признано полезным организовать в составе ГГО подразделение, специализирующееся на методическом, техническом (включая вопросы связи), метрологическом сопровождении и обеспечении мониторинга функционирования автоматизированной метеорологической сети.

В решении совещания были определены важнейшие направления деятельности организаций Росгидромета по развитию наземной метеорологической сети на ближайшие годы, и в первую очередь:

формирование системы закупки, технического обслуживания и ремонта оборудования автоматизированной метеорологической сети для обеспечения ее бесперебойного функционирования;

углубление комплексной модернизации автоматизированной метеорологической сети за счет расширения номенклатуры дат-

чиков АМК, перехода на учащенные сроки измерений и перевода НП на передачу всего потока информации в таблично-ориентированных кодовых формах (ТОКФ);

внедрение в оперативную работу сети новейших телекоммуникационных технологий;

усовершенствование метрологического обеспечения и расширение метрологического обслуживания за счет поставки дополнительного количества МАПЛ во все УГМС и крупные (число НП не менее 15) ЦГМС;

существенное улучшение энергообеспечения НП за счет использования возобновляемых источников энергии;

расширение сферы применения данных непрерывных измерений в интересах различных категорий потребителей (обновление прогнозов погоды, обнаружение опасных явлений и др.).

Совещание прошло в деловой обстановке. Состоявшийся обмен опытом оказался крайне полезным для всех присутствующих, которые высказали пожелание в адрес ГГО, ВНИИГМИ—МЦД и Гидрометцентра России о целесообразности проведения в ближайшие два года семинара метеорологов для обмена опытом работы по обеспечению функционирования автоматизированной сети и ее метрологического обеспечения, а также рассмотрения результатов параллельных синхронных наблюдений.

Владимир Михайлович Катцов **К 50-летию со дня рождения**

19 июля 2011 г. исполнилось 50 лет директору Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, доктору физико-математических наук, ведущему специалисту в области исследований климата Земли и математического моделирования крупномасштабных атмосферных и океанических процессов Владимиру Михайловичу Катцову.

В. М. Катцов родился в 1961 г. в Кишиневе, где прошли его детские и школьные годы. В 1978 г. он поступил в Ленинградский гидрометеорологический институт, который с отличием окончил в 1983 г. по специальности «океанология». По окончании института В. М. Катцов был призван на службу в Вооруженные Силы СССР в качестве инженера-метеоролога. После демобилизации он в 1985 г. поступил в аспирантуру Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР, которую окончил в 1988 г. В аспирантуре им была подготовлена (под руководством проф. Б. А. Кагана) и вскоре по окончании аспирантуры защищена диссертационная работа, посвященная исследованию океанских приливов. В это же время В. М. Катцов окончил факультет романо-германской филологии Калининского государственного университета по специальности «английский язык и литература», а двумя годами позднее — Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «математика».

С 1988 г. В. М. Катцов работает в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, где за сравнительно небольшой срок прошел путь от младшего научного сотрудника в лаборатории численного моделирования общей циркуляции атмосферы и климата (руководитель В. П. Мелешко) до заведующего отделом динамической метеорологии. В 2007 г. за работу «Исследование динамики климата высоких широт с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана» В. М. Катцову была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук.

В марте 2007 г. В. М. Катцов был назначен директором ГГО.

Научные интересы В. М. Катцова, помимо трехмерного моделирования климатической системы Земли, включают динамику климата высоких широт, обратные связи в климатической системе, методы оценки качества и дискриминации климатических моделей, предназначенных для оценки будущих изменений климата. В этих областях он является авторитетным международным экспертом.

В. М. Катцов активно участвует в работе различных рабочих групп Всемирной программы исследования климата (WCRP) (Рабочей группы по численному экспериментированию (WGNE) в 2000—2005 гг.; научного комитета проекта «Климат и криосфера» (CliC) в 2007—2008 гг.; Объединенного научного комитета WCRP с 2009 г.) и ряда других международных организаций (Научного консультационного комитета Международного климатического центра стран Азиатско-Тихоокеанского экономического сотрудничества (APCC) с 2006 г.; Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS), Международного геодезического и геофизического союза (IUGG) с 2007 г.). С 2006 г. В. М. Катцов входит в Совет по климату РАН.

В. М. Катцов — автор более 70 научных публикаций в рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях.

В. М. Катцов является одним из ведущих авторов III (2001), IV (2007) и V (готовится к изданию) Оценочных докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), удостоенной в 2007 г. Нобелевской премии мира, а также ведущим автором международного доклада «Оценка климатических воздействий в Арктике» (ACIA, 2005). В. М. Катцов — один из ключевых авторов первого в нашей стране «Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации», опубликованного Росгидрометом в 2008 г.

В течение ряда лет в качестве члена программных и организационных комитетов В. М. Катцов участвует в организации российских и международных совещаний и конференций, включая III Всемирную метеорологическую конференцию в Женеве в 2009 г., VI Всероссийский метеорологический съезд 2009 г., международную научную конференцию «Проблемы адаптации к изменениям климата» (2011 г.).

В 2008—2009 гг. под руководством В. М. Катцова был подготовлен проект Климатической доктрины Российской Федерации (утверждена Президентом Д. А. Медведевым 19 декабря 2009 г.), представляющей собой систему взглядов на цель, задачи, принципы, содержание и пути реализации единой государственной политики РФ в отношении климата. А в 2010 г. (во исполнение поручения Совета Безопасности Российской Федерации от 17 марта 2010 г.) в рамках реализации Климатической доктрины В. М. Катцов возглавил рабочую группу по подготовке Комплексного плана научных исследований погоды и климата.

Под руководством В. М. Катцова выполнена работа по комплексной междисциплинарной оценке макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации, и в 2011 г. опубликован доклад «Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу», в котором подробно рассматриваются воздействия погодно-климатических изменений на динамику и качественные показатели развития основных производственных комплексов российской экономики, а также развитие регионов страны; анализируются ключевые направления и группы мероприятий по их адаптации к указанным воздействиям и снижению рисков изменений климата для экономики; выделяется роль науки как ключевого фактора адаптации экономики и общества в целом к изменениям климата.

Работа В. М. Катцова неоднократно отмечалась руководителем Росгидромета, в 2005 г. ему было присвоено звание «Почетный работник Гидрометслужбы РФ», а в 2010 г. указом Президента Российской Федерации В. М. Катцов был награжден орденом Дружбы.

В. М. Катцова отличают активная жизненная позиция, умение определять текущие и перспективные задачи, большая трудоспособность.

Коллектив Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова сердечно поздравляет Владимира Михайловича с юбилеем, желает крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и новых творческих успехов!

Дмитрий Петрович Беспалов **К 90-летию со дня рождения**

6 ноября 2011 г. отметил свое 90-летие Дмитрий Петрович Беспалов, кандидат физико-математических наук, известный метеоролог-методист, ученый хранитель музея метеорологии, старейший сотрудник Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова.

Д. П. Беспалов родился и провел свои детские и школьные годы в г. Красное Село (под Ленинградом). В 1938 г. он поступил на математико-механический факультет Ленинградского государственного университета, где проучился до 1940 г. Во время Великой Отечественной войны, с октября 1941 г., и по май 1946 г. Д. П. Беспалов находился на службе в рядах Советской Армии, с 1943 г. в качестве командира теодолитного отделения фронтовой гидрометеорологической станции Ленинградского фронта.

По возвращении в 1947 г. в Ленинград Д. П. Беспалов заочно окончил Ленинградский гидрометеорологический институт, затем заочную аспирантуру в ГГО и в 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Д. П. Беспалов работает в ГГО с 1949 г. Через год после защиты диссертации он возглавил и на протяжении 30 лет руководил методическим отделом ГГО, который определял деятельность метеорологической сети Росгидромета. Как методист Д. П. Беспалов разработал ряд приборов и установок, которые были внедрены на сети метеорологических станций. Под его руководством готовились наставления и руководящие документы, разрабатывались разнообразные датчики и измерительные комплексы, создавались и внедрялись новые методы метеорологических наблюдений, осуществлялись автоматизация измерений и перевод обработки данных на ЭВМ. При активном участии Д. П. Беспалова специалисты методического отдела ГГО занимались разработкой научно-методических основ рационального построения подсистем

мы приземных метеонаблюдений, внедрением методов объективного анализа режимной метеорологической информации, составлением перспективных планов расширения и развития сети. Именно тогда был заложен запас прочности, на котором гидрометеорологическая сеть России держится с начала 90-х годов.

Д. П. Беспалов принимал участие в методических инспекциях и научных экспедициях в разных регионах нашей страны. Он побывал на дрейфующих станциях «Северный полюс-4» и «Северный полюс-5».

Под его редакцией было издано около 20 тематических выпусков Трудов ГГО.

В 1999 г. Д. П. Беспалов стал ученым хранителем музея ГГО. На этом посту он, как и в былые годы, действовал энергично и творчески. Благодаря его упорству и целеустремленности экспозиция музея была создана заново. В настоящее время в музее ГГО представлены все основные этапы гидрометеорологического приборостроения. Экскурсии, которые проводит Дмитрий Петрович, — это уникальный курс занимательной науки.

Деятельность Д. П. Беспалова неоднократно отмечалась руководством Росгидромета и ГГО. Он имеет боевые награды. В 1999 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный метеоролог Российской Федерации».

Дмитрий Петрович возглавляет Совет ветеранов ГГО. Его профессиональная компетентность, доброжелательность и чуткость снискали всеобщие любовь и уважение.

Болезнь не позволила Д. П. Беспалову встретить свой юбилей на трудовом посту.

Коллектив ГГО горячо и сердечно поздравляет Д. П. Беспалова с замечательным юбилеем и желает ему скорейшего выздоровления.

Андрей Александрович Синькевич **К 60-летию со дня рождения**

8 декабря 2011 г. исполняется 60 лет известному специалисту в области физики облаков и активных воздействий, доктору технических наук, главному научному сотруднику Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова Андрею Александровичу Синькевичу.

А. А. Синькевич родился в г. Львове. В 1969 г. он закончил в Ленинграде среднюю школу с преподаванием ряда предметов на английском языке и поступил на радиотехнический факультет Ленинградского института авиационного приборостроения (ЛИАП).

В 1975 г. после окончания ЛИАПа А. А. Синькевич начал работать в отделе физики облаков и активных воздействий Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова.

В ГГО А. А. Синькевич занимал должности инженера, старшего инженера, младшего, старшего, ведущего научного сотрудника, заместителя заведующего, а впоследствии заведующего отделом физики облаков, активных воздействий и радиационных исследований.

В 1982 г. Андрей Александрович защитил кандидатскую диссертацию «Экспериментальное исследование термических характеристик облаков с помощью радиометра ИК-диапазона», а в 1992 г. — докторскую диссертацию «Создание комплекса самолетной метеорологической аппаратуры, разработка методики ее применения и результаты экспериментальных исследований облаков».

В период с 1977 по 1992 г. под непосредственным руководством А. А. Синькевича на самолетах Ил-14 и Як-42 были созданы уникальные лаборатории для исследований по физике облаков и активных воздействий. В комплект оборудования летающих лабораторий был включен и разработанный А. А. Синькевичем ИК-радиометр. В результате многочисленных самолетных экспериментов были получены данные о термодинамическом состоянии облаков, проведены работы по воздействиям на облака и

оценке эффективности этих воздействий. Результаты этих работ обобщены в монографии о характеристиках облаков Северо-Запада России.

А. А. Синькевич неоднократно принимал участие в работах по активным воздействиям на облака с целью предотвращения осадков в Ленинграде, когда в экспериментах одновременно использовались несколько самолетов, радиолокатор и наземная осадкомерная сеть.

В последние 20 лет исследования А. А. Синькевича связаны с проведением лабораторных экспериментов по изучению микрофизических и электрических процессов в облаках. Им также выполнен цикл работ по исследованию динамики кучево-дождевых облаков на основе радиолокационных данных и информации спутника «Метеосат».

Его работы по исследованию микроструктуры облаков арктического бассейна являются новым шагом в изучении облаков Арктики.

А. А. Синькевич продолжает работы по совершенствованию метеорологических приборов. Под его руководством в ГГО был разработан новый прибор для измерения гололеда, основанный на теории распознавания образов.

В последние десять лет А. А. Синькевич активно участвует в международных проектах и экспериментах по активным воздействиям, проводимых в Южной Корее, США, Индии, Канаде и Саудовской Аравии.

А. А. Синькевичем опубликовано более 150 научных работ, среди которых несколько монографий. Он постоянный участник отечественных и международных научных конференций.

А. А. Синькевич — член Ученого совета ГГО и проблемного совета Росгидромета по активным воздействиям.

Награжден знаком «Почетный работник Гидрометслужбы России».

Коллеги и друзья сердечно поздравляют Андрея Александровича с юбилеем и желают ему новых творческих успехов.

Памяти К. С. Шифрина (1918—2011)

2 июня с.г. из маленького американского городка Олбани (штат Орегон) пришла печальная весть. Ушел из жизни выдающийся физик-теоретик, специалист в области оптики атмосферы и океана Кузиэль Соломонович Шифрин.

Кузиэль Соломонович родился 26 июля 1918 г. в г. Мстиславле (Беларусь). В 1940 г. он окончил одновременно два факультета Ленинградского университета — физический и математико-механический — и поступил в аспирантуру Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ), где специализировался в области теоретической физики под руководством выдающегося физика, чл.-корр. АН СССР Я. И. Френкеля. В 1943 г. К. С. Шифрин защитил кандидатскую диссертацию. Его фундаментальная работа «К теории электрических свойств сильно проводящих полупроводников», опубликованная в 1944 г. в «Журнале технической физики», получила мировое признание и цитируется до настоящего времени.

В 1943—1944 гг. К. С. Шифрин преподавал на кафедре физики Ленинградской военно-воздушной академии им. Можайского, находившейся тогда в г. Йошкар-Оле, затем — до конца 1945 г. — на кафедре физики Казанского авиационного института.

В 1946 г., вернувшись в Ленинград, К. С. Шифрин поступает на работу в Главную геофизическую обсерваторию им. А. И. Воейкова, где вначале работает в отделе прикладной метеорологии, а затем становится заведующим лабораторией в отделе радиационных исследований. В этот период он активно занимается решением прямых и обратных задач, связанных с рассеянием электромагнитных волн частицами. Результаты фундаментальных исследований в этой области были опубликованы в 1951 г. в монографии «Рассеяние света в мутной среде». В том же году на Ученом совете Государственного оптического института К. С. Шифрин защитил докторскую диссертацию.

В ГГО К. С. Шифрин проводил исследования по широкому кругу геофизических проблем, он активно занимался развитием теории рассеяния волн, исследованием распространения в атмосфере видимой, инфракрасной и микроволновой радиации, кинетикой образования облаков, разработкой радиационной модели безоблачной и облачной атмосферы, теорией наклонной видимости и яркости, атмосферным аэрозолем, атмосферным электричеством, радиолокационной метеорологией.

В 1964—1967 гг. он теоретически обосновал метод пассивной радиолокации, в основу которого была заложена идея использования теплового излучения для СВЧ пассивного зондирования системы Земля—атмосфера.

В 1969 г. К. С. Шифрин перешел на работу в Ленинградское отделение Института океанологии АН СССР (ИОАН), где сосредоточился на изучении оптики океана, решении проблем дистанционного зондирования морских акваторий. В эти годы им был разработан метод определения концентрации и среднего размера частиц взвеси (в частности, хлорофилла), изучены особенности радиотеплолокации нефтяных пленок на спокойной и взволнованной морской поверхности и др. Мировое признание получила подготовленная им в этот период монография «Введение в оптику океана» (Л.: Гидрометеиздат, 1983).

С конца 1992 г. по 2003 г. К. С. Шифрин — профессор Орегонского университета, США. Однако все эти годы он продолжает активное научное сотрудничество с ГГО, РГГМУ, ИОАН, ИНОЗ РАН и другими ведущими российскими научно-исследовательскими центрами.

К. С. Шифрин внес фундаментальный вклад в теорию прямых и обратных задач рассеяния света частицами разной (регулярной и случайной) формы и ряд других важных направлений физики атмосферы и океана.

К. С. Шифрин опубликовал свыше 400 научных работ, среди которых переведенные на английский язык монографии «Рассеяние света в мутной среде» и «Введение в оптику океана»,

а также «Таблицы по светорассеянию» в пяти томах. Под его редакцией было опубликовано более 20 книг и монографий по вопросам гидрометеорологии, дистанционного зондирования, физики атмосферы и океана.

В 1973 г. он организовал Рабочую группу по оптике океана при Комиссии по проблемам Мирового океана АН СССР, которой на протяжении 20 лет руководил. Рабочая группа провела одиннадцать пленумов-конференций и выпустила семь сборников трудов.

На протяжении многих лет К. С. Шифрин вел активную преподавательскую деятельность в Ленинградском гидрометеорологическом институте (ныне РГГМУ) и Лесотехнической академии.

К. С. Шифрин относился к категории ученых, внесших выдающийся вклад в отечественную и мировую науку. Его высочайшая квалификация была безоговорочно признана мировым научным сообществом: он состоял членом Международного геофизического союза, Российского оптического общества, Российского физического общества, Итальянской геофизической ассоциации, Американского оптического общества и др.

К. С. Шифрин был глубоко порядочным, на редкость скромным, добрым, доброжелательным и обаятельным человеком. Он всегда излучал радушие и готовность помочь любому обратившемуся к нему человеку. Эти человеческие качества Кусиэля Соломоновича в сочетании с его широчайшей научной эрудицией, мощным научным потенциалом снискали ему глубокое уважение и любовь огромного числа людей, соприкасавшихся с ним в разных странах и в разные времена. Это в полной мере проявилось в 2008 г., когда отмечалось 90-летие Кусиэля Соломоновича.

Уход Кусиэля Соломоновича из жизни — огромная потеря для мирового научного сообщества. Его имя, несомненно, войдет в историю отечественной и мировой науки.

Светлая память о Кусиэле Соломоновиче навсегда сохранится и в сердцах всех тех, кому посчастливилось в своей жизни соприкоснуться с этим блестящим ученым, выдающимся Учителем и замечательным человеком.

УДК 551.583

Морской лед в моделях СМР5: ближе к реальности? Павлова Т. В., Катцов В. М., Говоркова В. А. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 7—18.

Рассматриваются предварительные результаты анализа расчетов ледяного покрова Мирового океана в 20-м веке с помощью ансамбля климатических моделей СМР5. Проводится сопоставление качества расчетов морского льда с моделями предыдущего поколения — СМР3. Обсуждается способность моделей воспроизводить наблюдаемую протяженность ледяного покрова Мирового океана как в среднем — в сезонном ходе, так и на протяжении последних десятилетий, для которых в Северном полушарии наблюдалось резкое сокращение площади льда в летний период.

Ключевые слова: морской лед, Мировой океан, ансамбль климатических моделей СМР5.

Ил. 6. Библ. 6.

УДК 551.006.92 (47+57)

Модернизация метеорологической сети Росгидромета: итоги и уроки. Кондратьев В. И. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 19—39.

Даются характеристики состояния метеорологической сети на середину нулевых годов XXI века и приводится обоснование необходимости ее глубокой модернизации. Излагаются основные цели модернизации метеорологической сети в рамках Проекта «Модернизация и техническое перевооружение организаций и учреждений Росгидромета».

Сформулированы цели и задачи ГГО по научно-методическому сопровождению Проекта модернизации и основные этапы необходимые для положительных изменений в работе метеорологической сети в результате ее модернизации.

Излагаются основные мероприятия ГГО по научно-методическому сопровождению проекта. Анализируется успешность применения разработанных методических, организационно-технических и административно-хозяйственных рекомендаций УГМС, регламентирующих выполнение необходимых работ на каждом этапе модернизации.

Сформулированы предварительные предложения по изменению технологии производства наблюдений, сбору, передаче, анализу и хранению наблюдаемой информации.

Анализируются результаты модернизации метеорологической сети в организациях Росгидромета, на октябрь 2011 года недостатки и ошибки, допущенные в процессе ее реализации, сформулированы предложения по дальнейшему развитию работ по широкомасштабной модернизации.

Ключевые слова: Государственная наблюдательная сеть, метеорологические наблюдения, модернизация метеорологической сети, научно-методическое обеспечение работ, автоматизация наблюдений, проект модернизации.

Ил. 1. Библ. 4.

УДК 551.006.92 (47+57)

О применении международных стандартов ИСО для повышения качества измерений на государственной наблюдательной сети. Светлова Т. П. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 40—50.

Введенный в действие в 2002 г. ГОСТ Р ИСО 5725 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений» впервые регламентировал его прямое применение для измерений в окружающей среде и, что особенно важно, для оценки качества стандартизируемых и применяемых методик выполнения измерений.

При метеорологических наблюдениях, осуществляемых в натуральных условиях окружающей среды, когда методические погрешности в ряде случаев многократно превышают погрешности средств измерений, а стабильность показателей условий измерений не всегда обеспечивается надлежащим содержанием охранных зон метеорологических площадок, качественными показателями точности применяемых методик в отсутствие необходимых эталонов наблюдаемых величин являются результаты пространственного контроля метеорологических величин и их характеристик.

Ключевые слова: метеорологические измерения, стандартизация, стабильность составляющих погрешности.

Библ. 13.

УДК 551.006.92 (47+57)

О модернизации метеорологической сети. Луцько Л. В., Махоткина Е. Л. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 51—65.

Анализируются результаты модернизации актинометрической сети Росгидромета, на октябрь 2011 г. Сформулированы предложения по дальнейшему развитию работ по широкомасштабной модернизации.

Ключевые слова: актинометрические наблюдения, модернизация сети, научно-методическое обеспечение работ, автоматизация наблюдений.

Ил. 9. Библ. 4.

УДК 551.340, 551.345, 551.510

Модельные оценки влияния режима увлажнения почвы на эволюцию естественной эмиссии метана с территорий избыточного увлажнения в Сибири. Пикалёва А. А. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 66—88.

Исследуется влияние режима увлажнения на скорость эмиссии метана с территории болотных экосистем Сибири. Параметризация потоков CH_4 основана на взаимосвязи эмиссии с температурой слоя сезонного протаивания и уровнем болотных вод. В качестве внешнего воздействия используются данные региональной климатической модели ГГО и модели теплопередачи в грунте. Уровень болотных вод определяется через соотношение количества влаги в почве к ее максимальной влагоемкости. Показано, что влажность оказывает меньшее влияние на пространственную картину распределения потоков CH_4 , по сравнению с температурой. Получены пространственные распределения интенсивности естественной эмиссии метана в условиях современного климата и возможные изменения в середине 21 века. Анализ показал, что в Сибири интегральная эмиссия метана из-за потепления климата через 50 лет может возрасти в 1,3—1,5 раза.

Ключевые слова: влажность почвы, уровень грунтовых вод, пространственное распределение эмиссии метана, региональная климатическая модель, изменение климата.

Ил. 7. Библ. 35.

УДК 551.5: 001.891.57

Численная схема мониторинга динамики запасов продуктивной влаги и составляющих углеродного баланса органического вещества пахотных почв. Семендяев А. К. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 89—103.

Разработана численная схема мониторинга динамики запасов продуктивной влаги и углеродного баланса органического вещества пахотных почв, охватывающая 30 регионов Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов. Расчетная схема впервые позволяет вести непрерывный круглогодичный мониторинг без необходимости задания ежегодных начальных условий для влажности почвы. Реализованная схема позволяет оценить многолетние тренды влажности почвы на территории Русской равнины за последние десятилетия на основании реанализа многолетних временных рядов влагозапасов почвы. Составляющие углеродного и водного баланса почвы могут быть использованы как предикторы при долгосрочном прогнозе урожайности. Показано, что учет динамики составляющих углеродного баланса наряду с учетом составляющих водного баланса позволяет существенно повысить информационную значимость численного мониторинга для расчета и прогнозирования продуктивности сельского хозяйства.

Ключевые слова: численная схема, мониторинг, влагозапасы почвы, углеродный баланс органического вещества почвы.

Табл. 6. Библ. 4.

УДК 551.3+519.63

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

Предложена математическая модель полей конвективных облаков на небольших высотах. Модель основана на уравнениях несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска и рассматривает динамику турбулентного атмосферного пограничного слоя с применением модели больших вихрей (LES). В модели учитываются конденсация пара и испарение облачных капель без образования дождя. На примере задачи распада вихря Тейлора—Грина продемонстрирована точность и работоспособность вычислительного алгоритма.

Ключевые слова: численное моделирование, конвективные облака, LES модель, теория Монина—Обухова.

Ил. 1. Библ. 36.

УДК 551.3+519.63

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

Представлены результаты тестирования вихреразрешающей (LES) модели полей кучевых облаков на основе данных наблюдений в районе острова Пуэрто-Рико 15 декабря 1972 г. Рассчитано вертикальное распределение коэффициента турбулентной диффузии с помощью метода маркера. Определена высота нижней и верхней границы облаков. Получены функции распределения плотности вероятности вертикальной скорости на различных высотах и доли площади восходящих и нисходящих потоков. Расчеты были выполнены с помощью параллельной программы на суперкомпьютере МГУ «Чебышев». Показано удовлетворительное согласие результатов расчетов с данными наблюдений, а также с результатами расчетов других авторов, имеющимися в литературе.

Ключевые слова: численное моделирование, поля конвективных облаков, LES модель, функция распределения.

Ил. 8. Библ. 19.

УДК 551.510.7

Моделирование направленного рассеяния излучения сферически неоднородной частицей. Ржонсницкая Ю. Б. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 147—154.

Рассматривается возможность решения проблемы достоверности, с которой характеристики атмосферного аэрозоля определяются по результатам фотоэлектрических измерений. Модельные расчеты, выполненные для сферической частицы с радиально переменным показателем преломления, показывают, что можно повысить точность измерений за счет использования соответствующего угла рассеяния.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, определение размеров, углы рассеяния, моделирование.

Ил. 2. Библ. 4.

УДК 551.582

Оценка «риска доверия» климатическому прогнозу методом нечеткой логики. Галюк Л. П., Кобышева Н. В., Рыбалка Н. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 155—165.

Описан новый подход к оценке значимости результатов моделирования будущего климата, основанный на теории нечетких множеств. Приведен пример расчета для прогнозируемой средней месячной температуры воздуха.

Ключевые слова: оценка значимости, температура воздуха, климатическая модель, нечеткие множества, лингвистическая переменная, функция принадлежности.

Табл. 2. Ил. 4. Библ. 4.

УДК 004.62:551.4

Организация контроля качества информации, включаемой в фонд данных. Шаймарданов В. М. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 166—177.

Для полноценного обслуживания потребителей необходимы данные, в максимальной степени достоверные, поэтому перед записью информации для долговременного хранения в роботизированную библиотеку ее подвергают тщательному контролю, чтобы обеспечить наиболее высокое возможное качество данных до того, как они будут доставлены потребителям. Имеющиеся к настоящему времени методы контроля основных видов гидрометеорологических данных, успешно обнаруживающие ошибки, адаптированы, частично подправлены и включены в работу. Также используется разработанный автором новый метод мониторинга качества.

Ключевые слова: данные, качество данных, контроль данных, информационные ресурсы.

Библ. 5.

УДК 551.521.31

Контроль качества актинометрической информации в Мировом центре радиационных данных. Самукова Е. А., Смирнова Н. И. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 178—195.

Рассматриваются методы контроля прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, используемые в Мировом центре радиационных данных. Описываются показатели качества радиационных значений, присваиваемые в процессе контроля. Представлены результаты контроля актинометрической информации за 2009 г., предоставленной национальными метеослужбами 49 стран.

Ключевые слова: прямая, рассеянная и суммарная солнечная радиация, контроль качества, показатели качества.

Табл. 2. Ил. 6. Библ. 18.

УДК 551.52.521

Специализированные характеристики интенсивности осадков, применяемые в ЕС для проектирования систем отведения дождевых вод. Иванова Е. В., Ницис В. Э. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 196—204.

Предложена методика расчета специализированных показателей интенсивности осадков (теоретического профиля дождя). Данная информация включена в нормативные документы ЕС, касающиеся проектирования систем водоотведения. Полученные результаты могут быть использованы при проведении строительных работ на территории РФ иностранными компаниями, а также для уточнения российских СНиПов в связи с их актуализацией и приведением в соответствие с европейскими нормативными документами.

Ключевые слова: интенсивность дождя, профиль дождя, системы водоотведения, строительные нормы и правила.

Табл. 2. Ил. 2. Библ. 6.

УДК 551.006.92 (47+57)

Об обеспечении единства измерений и требований к метеорологическим измерениям в натуральных условиях окружающей среды. Светлова Т. П. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 205—216.

Методические погрешности измерений метеорологических величин многократно превышают инструментальные погрешности, регламентированные многочисленными стандартами РФ. Кроме того, метеорологические наблюдения включают, помимо измерений, многочисленные визуальные оценки гидрометеорологических явлений, характеризующих состояние окружающей среды.

Однако до настоящего времени попытки унифицировать понятие методики производства наблюдений, несмотря на необходимость разграничить функции государственного регулирования и ведомства (Росгидромета), не находят поддержки даже у базовой метрологической организации Росгидромета, что неправильно.

Представляется, что в связи с резолюцией Совета ИСО о признании ВМО в качестве международного органа по стандартизации и приданием приоритета разработке Руководства ВМО по осуществлению систем управления качеством результатов наблюдений Глобальной системы наблюдений затронутая проблема остается злободневной.

Ключевые слова: окружающая среда, метеорологические измерения, обеспечение единства измерений.

Библ. 11.

УДК 551.508:551.585

О комплексной оценке погодно-климатических условий при многокомпонентных загрязнениях воздуха. Кожевников Б. Л. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 217—222.

На примере смога показана работоспособность энтропийного информационно-статистического метода для оценки качества (агрессивности) атмосферных условий при многокомпонентных загрязнениях воздуха в сочетании с явлениями погоды и температурными воздействиями.

Ключевые слова: качество атмосферы, погодно-климатические условия, смог, энтропийный метод комплексной оценки агрессивности.

Библ. 8.

УДК 551.510.42

Результаты мониторинга основных парниковых газов на арктических станциях Росгидромета. Решетников А. И., Зинченко А. В., Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Ивахов В. М., Казакова К. В. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 223—240.

Изложены результаты многолетних наблюдений основных парниковых газов (ПГ) CO_2 и CH_4 на станциях Росгидромета и выполнен анализ тенденций изменений их концентраций. Подробно сравниваются результаты мониторинга концентраций ПГ на двух станциях Арктического региона, одну из которых (Териберка, Кольский полуостров) можно рассматривать в качестве фоновой, а другую (Новый Порт, полуостров Ямал) — в качестве станции, данные измерений на которой отражают влияние техногенных выбросов ПГ на месторождения природного газа и нефти на севере Западной Сибири. Показано, что на основе данных мониторинга концентрации метана на станции Новый Порт возможен контроль относительных изменений антропогенной эмиссии метана в атмосферу на газовых месторождениях.

Ключевые слова: мониторинг, парниковые газы, Кольский полуостров, полуостров Ямал, техногенные выбросы в атмосферу, эмиссия болот.

Табл. 3. Ил. 9. Библ. 11.

УДК 551.509.314: (551.507:629.73)

Сравнительный анализ алгоритмов статистической обработки результатов инструментальных измерений высоты нижней границы облаков применительно к задаче краткосрочного прогноза характеристик облачности при метеорологическом обеспечении взлета/посадки воздушных судов. Круглов Р. А., Дробинская А. В. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 241—250.

Представлены результаты статистической обработки данных измерений высоты нижней границы облаков с помощью алгоритмов, содержащих процедуру выделения облачных слоев с оценкой количества облачности по критерию коэффициента сплоченности.

Дан сравнительный анализ алгоритмов применительно к задаче краткосрочного прогноза характеристик облачности на аэродроме.

Ключевые слова: аэродром, высота облаков, алгоритмы, краткосрочный прогноз.

Ил. 3. Библ. 9.

УДК 551.509.616

Создание искусственных облачных образований с целью изменения экстремальных температур (обзор). Мазуров Г. И., Козлов В. Н., Акселевич В. И. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 251—267.

Приводится обзор основных существующих способов создания искусственных облачных образований в верхней и средней тропосфере с помощью самолетов и в пограничном слое с использованием вертолетов. Описываются некоторые результаты натурных экспериментов по созданию искусственных образований с помощью вертолетов над сушей и морских судов над Балтийским и Черным морями. Выработаны рекомендации по снижению высоких температур летом и по повышению низких отрицательных температур зимой, а также по предотвращению ночных понижений температуры.

Ключевые слова: искусственные облачные образования, аэродинамический спутный след, экстремальные температуры, мегаполис, вертолет, самолет, морские суда.

Ил. 3. Библ. 36.

УДК 550.385

Коррекция магнитометрических данных, полученных с борта метеорологического геостационарного спутника «Электро». Воронин А. А. Труды ГГО. 2011. Вып. 564. С. 268—278.

Предварительный анализ данных измерений геомагнитного поля на орбите геостационарного спутника «Электро» выявил их существенное отличие от ожидаемых в соответствии с моделью геомагнитного поля значений в точке стояния спутника. Предлагается способ коррекции измеренных магнитометрических данных в рамках предположения о неточной ориентации немагнитной штанги, на которой были смонтированы датчики магнитометра. Из полученного набора данных были выбраны магнитоспокойные периоды с индексом геомагнитной активности $A_p < 7$. Для выбранных магнитоспокойных периодов по среднесуточным значениям трех компонентов измеренного поля рассчитаны углы Эйлера, обеспечивающие совпадение направлений измеренного поля и поля в точке стояния спутника, полученного в соответствии с моделью геомагнитного поля Алексева—Калегаяева. Найденная ориентация немагнитной штанги позволила скорректировать магнитометрические данные.

Табл. 1. Ил. 6. Библ. 6.

УДК 551.583

Sea ice in CMIP5 models: closer to reality? Pavlova T. V., Kattsov V. M., Govorkova V. A. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 7—18.

Preliminary results are analyzed of the World Ocean sea ice extent simulations over the 20th century using an ensemble of CMIP5 climate models. A comparative assessment is undertaken of the sea ice simulations against the previous generation models – CMIP3. The ability is discussed of the models to reproduce the observed extent of the World Ocean ice cover both averaged — in the seasonal cycle — and over past decades characterized by the observed fast shrink of the ice extent in summer.

Keywords: sea ice, World Ocean, an ensemble of CMIP5 climate models.

Fig. 6. Ref. 6.

УДК 551.006.92 (47+57)

Modernization of a meteorological network: conclusion and results. Kondratuk V. I. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 19—39.

It is given characteristics of a condition of a meteorological network on the middle of zero years of the XXI-st century and the substantiation of necessity of its deep modernization is resulted. Main objectives of modernization of a meteorological network within the limits of the Project «Modernization and modernization of the organizations and Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service establishments» are stated.

The purposes and problems ГТО on scientifically-methodical support of the Project of modernization and the basic stages necessary for positive changes in work of a meteorological network as a result of its modernization are formulated.

The basic actions ГТО for scientifically-methodical support of the project are stated.

Success of application developed methodical, organizational-technical and administrative recommendations УТМС, necessary works regulating performance at each stage of modernization is analyzed.

Preliminary offers on change of the production technology of supervision, gathering, transfer, the analysis and storage meteorological information are formulated.

Results of modernization of a meteorological network in Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service organizations, for October, 2011 lacks and the errors admitted in the course of its realization are analyzed; offers on the further development of works on large-scale modernization are formulated.

Keywords: State observant network, Meteorological supervision, Modernization of a meteorological network, Scientifically-methodical maintenance of works, automation of supervision, The modernization project.

Fig. 1. Ref. 4.

УДК 551.006.92 (47+57)

About application of international standards ISO for improvement of quality of measurements on the state observant network. Svetlova T. P. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 40—50.

Installed in 2002 of State standard specification R ISO № 5725 «Accuracy (trueness and precisions) methods and results of measurements» for the first time regulated its direct application for measurements in environment, and that is especially important, for an estimation of quality of standardized and applied techniques of performance of measurements.

At the meteorological supervision which are carried out in natural conditions of environment when methodical errors in some cases repeatedly exceed errors of measuring apparatuses, and stability of indicators of conditions of measurements isn't always provided with the appropriate maintenance of security zones of meteorological platforms, quality indicators of accuracy applied techniques (for lack of necessary standards) results of spatial control of meteorological sizes and their characteristics are.

Keywords: meteorological measurements, standardization, stability of components of an error.

Ref. 13.

УДК 551.006.92 (47+57)

Modernization of a aktinometrical network. Lutsko L. V., Makhotkina E. L. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 51—65.

Results of modernization of a aktinometrical network in Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service organizations, for October, 2011 are analyzed; offers on the further development of works on large-scale modernization are formulated.

Keywords: aktinometrical supervision, modernization of network, Scientifically-methodical maintenance of works, automation of supervision.

Fig. 9. Ref. 4.

УДК 551.340, 551.345, 551.510

Modeling assessments of soil moisture influence on the evolution of natural methane emissions from Siberian wetlands. Pikaleva A. A. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 66—88.

The influence of soil moisture on the rate of methane emission from Siberian wetlands is investigated. The methane flux is estimated using the relationship between its emission rate, seasonal thawing layer temperature and water table depth. As an external forcing the MGO regional climate model output and soil heat transfer model is used. The water table depth is parameterized by the ratio between actual soil moisture and maximum moisture capacity. It has been shown that soil moisture has less effect on the spatial distribution of CH₄ fluxes, as compared to temperature. Assessed are present day methane emission and its possible changes by the mid 21st century. It has been shown that the methane emission in Siberia can increase in 50 years due to climate warming by a factor of 1,3—1,5.

Keywords: soil moisture, water table depth, spatial distribution of methane emissions, regional climate model, climate changes.

Fig. 7. Ref. 35.

УДК 551.5: 001.891.57

Numerical scheme for monitoring of the dynamics of available moisture reserves and carbon balance components of organic matter in arable soils. Semendyaev A. K. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 89—103.

The numerical scheme for monitoring of the dynamics of available moisture reserves and carbon balance of organic matter in arable soils, covering 30 regions of the Central, Privolzhsky and Southern Federal Districts, was worked out. For the first time the calculation scheme makes possible the continuous year-round monitoring without specifying the initial conditions for soil moisture at the vegetation period. The scheme permits to estimate long-term trends of soil moisture on the Russian Plain, based on reanalysis of soil moisture reserves long series. The components of the carbon and water balance of the soil can be used as predictors for yield forecasts with significant lead time. It is shown that the inclusion of the dynamics of both the carbon balance and the water balance can significantly improve calculation and forecast of agricultural productivity.

Keywords: numerical scheme, monitoring, soil moisture reserves, carbon balance of soil organic matter.

Tab. 6. Ref. 4.

УДК 551.3+519.63

LES model of the cumulus cloud fields. Ignatyev A. A. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 104—125.

Mathematical model for cumulus clouds at small altitudes has been proposed. The model is based on equations for incompressible fluid in Boussinesq approach and considers dynamics of turbulent atmospheric boundary layer with usage of large eddy simulation method (LES). Water vapor condensation and cloud drops evaporation processes are taken into account in the model without precipitation. By example of Taylor—Green vortex decay problem robustness and accuracy of numerical algorithm has been shown.

Keywords: numerical modeling, cumulus clouds, LES model, Monin—Obukhov theory.

Fig. 1. Ref. 36.

УДК 551.3+519.63

To LES model usage for investigation of the cumulus cloud fields. Dovgaluk Yu. A., Ignatyev A. A. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 126—146.

Results of verification of the cumulus cloud field LES model based on the observations gathered near Puerto Rico on 15 December 1972 are presented. Vertical distribution of turbulent diffusion coefficient is calculated with marker method. Cloud base and tops are defined. Probability distribution functions for vertical velocity and fractional coverage of updrafts and downdrafts at different levels are obtained. Calculations have been carried out by means of the parallel code on Moscow State University supercomputer “Chebyshev”. Satisfactory agreement of numerical data with observations and other calculations being available in the literature is shown.

Keywords: numerical modeling, cumulus clouds fields, LES model, probability distribution function.

Fig. 8. Ref. 19.

УДК 551.510.7

Simulating of angular light scattering by inhomogeneous spherical particle.
Rzhonsnitskaya J. B. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 147—154.

The possibility of solution of the problem of the reliability with which the characteristics of the atmospheric aerosols are determined from the results of photoelectric measurements is discussed. The model calculations for spherical particle with the variable refractive index shows one can improve the situation by using the proper angles of scattering.

Keywords: atmospheric aerosols, size determination, angles of scattering, simulating.

Fig. 2. Ref. 4.

УДК 551.582

The assessment of climate model results credibility using the fuzzy-set theory.
Galuk L. P., Kobysheva N. V., Pibalko N. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 155—165.

New approach to the assessment of climate model results credibility is considered. The methodology presented is based on the fuzzy-set theory. The paper contains calculation example for predicted mean monthly temperature in St-Petersburg.

Keywords: significance assessment, air temperature, climate model, fuzzy-set theory, linguistic variable, membership function.

Tab. 2. Fig. 4. Ref. 4.

УДК 004.62:551.4

Organization of quality control of information including in the data fund.
Shaimardanov V. M. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 166—177.

To provide adequate consumer service, the data should be as much reliable as possible. So before recording data for long-term storage at the early stage and also during the storage before the use they are strictly controlled to provide the highest data quality before they are submitted to the customers. Today's methods of control of the main types of hydrometeorological data used to successfully detect errors have been adapted, partially corrected and put into service. Also a method of quality monitoring newly developed by the author is used

Keywords: data, data quality, data control, information resources.

Ref. 5.

УДК 551.521.31

Quality control of radiometric information at the World Radiation Data Center. Samukova E. A., Smirnova N. I. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 178—195.

The quality control methods for direct, diffuse and global solar radiation which are used at the World Radiation Data Center are examined. The quality flags of radiation values which are assigned in the process of quality control are described. The paper presents the results of quality control of radiometric information for 2009 submitted by national meteorological services from 49 countries.

Keywords: direct, diffuse and global solar radiation, quality control, quality flags.

Tab. 2. Fig. 6. Ref.18.

УДК 551.52.521

Specialized indexes of rain intensity for use in water disposal system projecting in EU. Ivanova E. V., Nizis V. E. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 196—204.

Specialized indexes of rain intensity are estimated using the methodology of “theoretical rainfall profile” plotting. These indexes are included in Building Codes pertaining to water disposal system projecting in European Union. Findings can be used for design work of foreign building companies on the Russian territory and also for improvement Building Codes of the Russian Federation, their updating and harmonization with European Building Codes.

Keywords: rain intensity, rainfall profile, water disposal system, Building Codes.

Tab. 2. Fig. 2. Ref. 6.

УДК 551.006.92 (47+57)

About maintenance of unity of measurements and requirements to meteorological measurements in natural conditions of environment. Svetlova T. P. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 205—216.

Methodical errors of measurements of meteorological sizes repeatedly exceed the tool errors regulated by numerous standards of the Russian Federation. Besides, meteorological supervision includes besides measurements numerous visual estimations of the hydrometeorological phenomena characterizing a state of environment.

However, till now attempts to unify concept a technique of manufacture of supervision, despite necessity to differentiate state regulation and department (Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service) function, don't find support even at the base metrological organization of department that is wrong.

It is represented that in connection with council ISO WMO resolution it is recognized as the international body on standardization and giving of a priority of working out of Management WMO on realization of control systems by quality results of supervision of Global system of supervision the mentioned problem remains topical.

Keywords: environment, meteorological measurements, maintenance of unity of measurements.

Ref. 12.

УДК 551.508:551.585

The integrate assessment for the aggressiveness of weather and climate conditions under multi-component air pollution. Kozhevnikov B. L. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 217—222.

On the example of smog was proved the effectiveness of the entropic informative-statistical method for the quality assessment (aggressiveness) of the atmospheric conditions under multi-component air pollutions combined with weather factors and thermal effects.

Keywords: atmosphere quality, weather and climate conditions, smog, entropic method of the integrated assessment for aggressiveness.

Ref. 8.

УДК 551.510.42

Results of main greenhouse gases monitoring at Arctic stations of Rosgidromet. Reshetnikov A. I., Zinchenko A. V., Paramonova N. N., Privalov V. I., Ivakhov V. M., Kazakova K. V. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 223—240.

The results of the long-term observations of the main greenhouse gases (GHG) CO₂ and CH₄ at the monitoring stations of Rosgidromet are presented and analysis of the tendency of their concentrations variations is performed. The results of GHG monitoring at two stations in Arctic region are compared in some detail, one of them (Tereiberka, Kola peninsula) can be considered as a background station, the other (Novy Port, Yamal peninsula) can be considered as the station the data of observations from that reflect the influence of GHG emissions at the gas and oil fields in the north of West Siberia. It is demonstrated that the check of relative variations of the man made emissions of methane to the atmosphere at the gas field is possible on a basis of methane concentration monitoring data from Novy Port station.

Keywords: monitoring, greenhouse gases, Kola peninsula, Yamal peninsula, man made emissions to the atmosphere, wetland emissions.

Tab. 3. Fig. 9. Ref. 11.

УДК 551.509.314: (551.507:629.73)

The comparative analysis of algorithms of statistical processing of results of the instrumental measurements of height of the cloud base with reference to a problem of the short-term forecast of characteristics of overcast at meteorological maintenance of takeoff/landing of aircrafts. Kruglov R. A., Drobinskaya A. V. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 241—250.

Results of statistical data processing of measurements of height of the cloud base by means of the algorithms containing procedure of allocation of cloud layers with an estimation of quantity of overcast by criterion of factor of unity are presented.

The comparative analysis of algorithms with reference to a problem of the short-term forecast of characteristics of overcast in airdrome is given.

Keywords: airdrome, height of clouds, algorithms, the short-term forecast.

Fig. 3. Ref. 9.

УДК 551.509.616

The creation of artificial cloud formations, aimed at leveling extreme temperatures. Mazurov G. I., Kozlov V. N., Akselevich V. I. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 251—267.

The article provides an overview of the main existing methods of creating artificial cloud formations in the upper and middle troposphere using aircrafts and in the boundary layer using helicopters. Some results of field experiments on creation of artificial entities with the help of helicopters over land and using sea vessels on the Baltic and Black Seas are described. Recommendations for reducing high temperatures in summer and rising low negative temperatures in winter, including frost prevention, have been made.

Keywords: artificial cloud formations, the aerodynamic trail line, extreme temperatures, helicopters, aircrafts, sea vessels.

Fig. 3. Ref. 36.

УДК 550.385

Correction of geomagnetic data measured onboard meteorological geostationary satellite “Electro”. Voronin A. A. Proceedings of MGO. 2011. V. 564. P. 268—278.

Preliminary analysis of the geomagnetic field data measured on the geosynchronous orbit onboard “Electro” satellite revealed the significant difference from the values at the standing point expected from the geomagnetic field model. In the paper a method for correcting the measured magnetic data under the assumption of inaccurate magnetic sensors carrying non-magnetic boom orientation is proposed. From the dataset selected were magnetically quiet intervals (the geomagnetic activity index $A_p < 7$). For selected intervals calculated were measured field three components daily averages and Euler’s angles ensuring the conformity of directions of the measured field vector and the Alekseev-Kalegaev geomagnetic model field vector. Basing on the obtained angles the satellite magnetometer data were corrected.

Tab. 1. Fig. 6. Ref. 6.

Сборник научных трудов

Труды ГГО. Вып. 564

Подписано в печать 30.11.2011. Формат $60 \times 84^{1/16}$. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 19,5. Тираж 300 экз. Заказ

Отпечатано в типографии ООО «Д'АРТ».

195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, 28.